

EVALUACION DEL SECADO CONVECTIVO ASISTIDO CON BOMBA DE CALOR EN
MUESTRAS DE MANGO TOMMY (Mangifera indica L.)

STEPHANY GUEVARA GUERRERO

JENNIFER LÓPEZ RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
SANTIAGO DE CALI

2013

EVALUACION DEL SECADO CONVECTIVO ASISTIDO CON BOMBA DE CALOR EN
MUESTRAS DE MANGO TOMMY (Mangifera indica L.)

STEPHANY GUEVARA GUERRERO
JENNIFER LÓPEZ RODRÍGUEZ

Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERAS (S) DE ALIMENTOS

Dirigido por:
ALFREDO ADOLFO AYALA APONTE, Ph.D

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
SANTIAGO DE CALI

2013

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Componentes nutricionales característicos del mango (valores dados para 100 g de fruta fresca).

Tabla 2. Diseño experimental del proceso de secado de mango por SBC

Tabla 3. Parámetros cinéticos de los modelos de Newton, Page y Henderson-Pabis en muestras de mango SCB

Tabla 4. Coeficiente de difusión efectiva

Tabla 5. Energía de activación para el secado de muestras mango

Tabla 6. Prueba ANOVA para rehidratación

Tabla 7. Valores de vitamina C como ácido ascórbico en muestras de mango deshidratadas en tres tratamientos.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del funcionamiento del secador asistido con bomba de calor.

Figura 2. Efecto de la humedad relativa sobre las cinéticas de secado de mango en SBC

Figura 3. Efecto de la velocidad del aire sobre las cinéticas de secado de mango en SBC

Figura 4. Cinéticas de secado y ajuste por el modelo de Page para humedades relativas y velocidades de aire obtenidas durante el SCB de mango.

Figura 5. Efecto de la humedad relativa sobre la actividad de agua en muestras de mango

Figura 6. Efecto de la velocidad del aire sobre la actividad de agua en muestras de mango.

Figura 7. Efecto de la humedad relativa en la luminosidad de muestras de mango.

Figura 8. Efecto de la humedad relativa en el parámetro b^*

Figura 9. Variación del parámetro (ΔE) a dos velocidades de aire.

Figura 10. Comportamiento del cambio de volumen en el secado a las tres condiciones de humedad relativa

Figura 11. Capacidad de rehidratación del mango deshidratado en SBC a HR 10%.

NOMENCLATURA

a*:	Coordenada cromática (rojo-verde)
ANOVA:	Análisis de varianza
a _w :	Actividad de agua
b*:	Coordenada cromática (amarillo-azul)
b.s:	Base seca
COR:	coeficiente de rehidratación
Def:	Coeficiente de difusión efectivo
Ea:	Energía de activación
Ec:	Ecuación
g:	Gramo
HR:	Humedad relativa del aire
L	Luminosidad
mg:	Miligramos
min:	Minutos
m _p :	Peso de picnómetro con agua
m _{p+mt} :	Peso de picnómetro con agua y muestra
m _t :	Peso de la muestra en cada tiempo
nm:	Nanómetros
R:	Constante universal de los gases
SBC:	Secado con bomba de calor
ss:	Sólido seco
TA:	Tiempos de análisis (para contenido humedad)
TO:	Tiempos de observación (para propiedades fisicoquímicas)
ΔE:	Cambio de color total
ΔV:	Cambio de volumen
°C:	Grados centígrados
K:	Grados kelvin
pa:	Densidad aparente
pl:	Densidad del líquido

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
2. JUSTIFICACIÓN.....	13
3. OBJETIVOS.....	14
OBJETIVO GENERAL.....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
4. MARCO TEÓRICO.....	15
4.1. GERENERALIDADES DEL MANGO TOMMY.....	15
4.2. CARACTERISTICAS DEL SECADO.....	17
4.3. SECADOR ASISTIDO CON BOMBA DE CALOR.....	18
4.4. PROPIEDADES FISICOQUIMICAS.....	20
4.4.1. Actividad de agua.....	20
4.4.2. Color.....	20
4.4.3. Volumen.....	21
4.4.4. Vitamina C.....	22
4.4.5. Rehidratación.....	22
4.5. ANTECEDENTES.....	23
4.5.1. Trabajos de secado de mango y otras frutas.....	23
4.5.2. Trabajos de secado de alimentos con bomba de calor.....	24
5. MATERIALES Y METODOS.....	26
5.1. Materia prima.....	26
5.2. Preparación de unidad experimental.....	26
5.3. Diseño experimental.....	26
5.3.1. Modelo estadístico.....	27
5.4. Determinación de las propiedades fisicoquímicas.....	27
5.4.1. Contenido de humedad.....	27
5.4.2. Actividad de agua.....	27
5.4.3. Color.....	27
5.4.4. Volumen.....	28
5.4.5. Rehidratación.....	28
5.4.6. Vitamina C.....	29
5.5. Modelamiento de cinéticas de secado.....	29
5.5.1. Coeficiente de difusión y energía de activación.....	30

5.6. Análisis estadístico	30
6. RESULTADOS Y DISCUSION.....	31
6.1. Cinéticas de secado	31
6.1.1. Efecto de la humedad relativa	31
6.1.2. Efecto de la velocidad del aire.....	32
6.2. Modelamiento de las cinéticas de secado	33
6.2.1. Coeficiente de difusión efectiva (D_{ef})	35
6.2.2. Energía de activación (E_a)	36
6.3. Propiedades fisicoquímicas	36
6.3.1. Actividad de agua (a_w).....	36
6.3.1.1. Efecto de la humedad relativa.....	37
6.3.1.2. Efecto de la velocidad del aire	38
6.3.2. Color	38
6.3.2.1. Luminosidad (L^*).....	38
6.3.2.2. Parámetro (b^*)	39
6.3.2.3. Cambio de color ΔE	40
6.3.3. Volumen o encogimiento	41
6.3.4. Rehidratación.....	42
6.3.5. Vitamina C.....	43
CONCLUSIONES.....	45
RECOMENDACIONES.....	47
BIBLIOGRAFIA.....	48
ANEXOS	54

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue evaluar el secado de muestras de mango (*Mangifera indica* L.) variedad Tommy-Atkins, mediante un secador asistido con una bomba de calor (SBC). Para ello se empleó un diseño experimental factorial, en el cual se evaluó el efecto de los factores humedad relativa (HR) a 10, 20 y 40% y la velocidad del aire a 0.8 y 1.2 m·s⁻¹ sobre las cinéticas de secado, actividad de agua (a_w), color (L, b^* y ΔE) y el volumen. Adicionalmente, se calcularon los coeficientes de difusión efectiva para cada tratamiento, la capacidad de rehidratación (CR) de muestras deshidratadas y el contenido de vitamina C. La CR se calculó para los tratamientos con porcentaje mayor de cambio de volumen (HR de 10% y velocidad de aire de 0.8 y 1.2 m s⁻¹). La cuantificación de vitamina C se realizó a los tratamientos a HR 10% y velocidad de aire 0.8 y 1.2 m s⁻¹ y HR 40% y velocidad de aire 0.8 m s⁻¹. Los valores experimentales de las cinéticas de secado se ajustaron mediante los modelos de Newton, Page y Henderson-Pabis.

Los análisis estadísticos evidenciaron que la velocidad del aire no afectó significativamente las variables de respuesta, mientras que la humedad relativa y la interacción entre los dos factores sí presentaron significancia ($P < 0.05$) para diferentes variables de respuesta. Los tratamientos con valores de HR bajos presentaron mayor pérdida de agua; a 90 min de secado para HR de 10, 20 y 40% y velocidad de 1.2 m·s⁻¹ se alcanzaron humedades en base seca de $14.9 \pm 0,07$, $71.6 \pm 0,21$ y $329 \pm 0,65$ % respectivamente, y a velocidad de 0.8 m·s⁻¹ se registraron valores de: 3.6 ± 0.009 , $111.7 \pm 0,0063$ y $376 \pm 0,97$ % respectivamente, lo que ratifica la importancia de la interacción entre los dos factores y del factor HR.

Se evidenciaron valores de actividad de agua (a_w) inferiores a 0.68 para las HR de 10 y 20% después de 120 min de secado. El cambio de volumen fue mayor para las HR de 10% que para las de 40%; sin embargo, su integridad celular no fue severamente afectada lo que permitió tener un comportamiento deseado en la capacidad de rehidratación.

Los cambios de los parámetros de L y b^* fueron estadísticamente afectados por la HR, mientras que el cambio total de color (ΔE) no fue influenciada por ninguno de los factores evaluados. El modelo de Page fue el que presentó el mejor ajuste, con un coeficiente de correlación (R^2) más cercano a 1 y el valor de x^2 más cercano a 0 en comparación con los otros dos modelos.

Los coeficientes de difusión disminuyeron con el aumento de HR y presentaron un orden de 10^{-8} m² s⁻¹. En cuanto a la energía de activación se encontró que disminuyó al aumentar la velocidad del aire.

Palabras claves: Secador asistido con bomba de calor (SBC), humedad relativa del aire (HR), velocidad del aire, actividad de agua (a_w).

INTRODUCCIÓN

El secado es una de las operaciones más utilizadas en la industria alimentaria para modificación y preservación, se extrae agua del alimento hasta cierto nivel, donde es minimizado el deterioro microbiano y las reacciones de deterioro químico (Krokida et al, 2002). Se proporciona una mayor vida útil, un peso más ligero para el transporte y menor espacio para su almacenamiento, es un proceso que requiere energía intensivamente y la calidad del producto puede ser degradada durante la operación.

Los principales parámetros de calidad evaluados en frutas y vegetales deshidratados son color, sabor, carga microbiana, retención de nutrientes, densidad, textura, propiedades de rehidratación, actividad de agua, presencia de contaminantes, pérdida de aromas y temperatura de transición vítrea (Sagar y Suresh, 2010).

En aras de mejorar y optimizar el consumo de energía nuevas tecnologías se han ido desarrollando en el método de secado. Entre ellas está el secador con bomba de calor es conocido por proporcionar energía eficiente al proceso de secado por recuperación del calor desde el aire seco (Dartico, 2009).

La integración de la bomba de calor y el secador se conoce como un secador de bomba de calor o un secador asistido con bomba de calor. Huang y Mujumdar (1993) afirman que estos secadores son energéticamente eficientes, proporcionando calor al sistema y recuperándolo a través del funcionamiento interno de la bomba de calor.

Estudios preliminares encontraron que cualidades como el color y el aroma de productos agrícolas secados con bombas de calor fueron mucho mejores que los productos que utilizan secadores de aire caliente convencional (Prasertsan y Saen-Saby, 1998).

El mango es una de las frutas tropicales que más se consumen en el mundo, su comercialización como fruta fresca y como producto cortado está ganando cada vez más importancia (Torres et al., 2007). Sin embargo, la fruta fresca cortada tiene una vida útil corta por efecto de la acción enzimática, cambios fisiológicos y fisicoquímicos (Soliva y Martín, 2003). Esto se debe a que algunas operaciones durante el cortado inducen cambios en las características fisicoquímicas y fisiológicas, por efecto de la mayor acción enzimática y algunos cambios fisiológicos (Toivonen y Brummell, 2008; Torres et al., 2007).

La mayoría de investigaciones en deshidratación de mango han estudiado la técnica de deshidratación osmótica y la forma en como optimizarlo mediante técnicas combinadas (Nieto et al. (2001), Tedjo et al. (2001), Moreno et al. (2009 y otros investigadores), han combinado diversas técnicas como el sometimiento de las muestras a pre-tratamientos de escaldado, pulsos eléctricos y altas presiones, pulsos de vacío y secado al vacío. El

estudio de secado de mango con bomba de calor no ha sido objeto de investigación, por lo tanto no se posee datos del efecto sobre las propiedades fisicoquímicos a evaluar en este proyecto.

Por las anteriores razones en este proyecto se evaluará la tecnología de secado asistido con bomba de calor (SBC) como medio de conservación del mango, de esta manera se espera ampliar el estado del conocimiento y ofrecer a la industria una alternativa para convertir este fruto en hojuelas listas para consumo directo garantizando la conservación de las características nutricionales respecto a la fruta fresca.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el secado convectivo con aire caliente se utilizan altas temperaturas que ocasionan pérdidas en contenido de vitaminas, cambios de color, cambio de volumen (daño de su estructura) y demás propiedades organolépticas que limitan el mercado de frutas y verduras secas. Las técnicas de deshidratación que buscan minimizar estos efectos generalmente resultan costosas y requieren de un proceso intensivo de energía, como lo son la liofilización y el secado al vacío. El mango es un fruto con alto contenido en vitaminas termo-sensibles y el empleo de temperaturas altas durante el secado ocasiona pérdidas de estos nutrientes y cambios significativos en sus propiedades fisicoquímicas. Por esta razón se hace necesario emplear nuevas alternativas de secado que minimicen las pérdidas de calidad en el alimento deshidratado, sin impactar desfavorablemente el medio ambiente, a un costo mínimo y a un máximo rendimiento.

2. JUSTIFICACIÓN

El interés de llevar a cabo este proyecto surge de la necesidad de emplear nuevas alternativas de secado para reducir las pérdidas de calidad de las frutas deshidratadas. Para ello se empleará la técnica de secado asistido con bomba de calor, la cual se ha demostrado que obtiene frutas secas con mejor calidad que otros métodos tradicionales de secado; minimiza el daño por calor, los cambios de color del producto seco, y la retención de volátiles y pigmentos (Krokida, 2000). El mango por ser una de las principales frutas producidas en el mundo, por su alta perecibilidad, propiedades organolépticas, nutricionales y ser sensible al calor se seleccionó para la evaluación de secado mediante bomba de calor.

3. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el proceso de secado en muestras de mango (*Mangifera indica* L.) variedad Tommy-Atkins mediante el secador asistido con bomba de calor (SBC).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la influencia de la humedad relativa y la velocidad del aire sobre las cinéticas de secado en muestras de mango.
- Evaluar los cambios de las propiedades fisicoquímicas (color, volumen y a_w) en muestras de mango secadas en un secador asistido con bomba de calor a distintas humedades relativas y velocidad de aire.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. GERENERALIDADES DEL MANGO TOMMY

El mango (*Mangifera indica* L.) es considerado como uno de los mejores frutos tropicales. Su extraordinario sabor, color y textura lo hacen especial, no sólo para su consumo en fresco, sino también como ingrediente en ensaladas de frutas, helados, mermeladas y pasteles. Con el fin de tener mango disponible para la industria alimentaria, no sólo en el mercado de productos frescos, sino también como un alimento procesado que mantenga sus propiedades sensoriales y nutricionales lo menos inalteradas posible se hace necesario un proceso que asegure un alimento de buena calidad que resulte una opción para aumentar su comercio en los países no productores. El secado de la fruta del mango puede ser una alternativa para que su vida útil sea más larga y su comercialización sea más fácil. Sin embargo, tradicionalmente los mangos secos tienen una textura indeseable, mal color y un sabor no fresco con una pérdida de valor nutritivo que reduce su importancia económica (Durance, Wang, y Meyer, 1999).

Es originario de la India y se cree que comenzó a cultivarse 2.000 años antes de Cristo, aunque se supone que ya era conocido mucho tiempo atrás. Algunos botánicos estiman que esta planta fue domesticada por el hombre desde hace 6000 años. El árbol que lo produce, el fruto *Mangifera indica* L., es descendiente de una de las más de cuarenta especies silvestres que todavía existen en el noroeste de India, Filipinas y Papua Guinea. Hacia el siglo XVI era ya un símbolo de estatus en India. El cultivo de este fruto era un privilegio de los rajás y nababs. Los colonizadores portugueses fueron los que llevaron este cultivo a África y luego a Brasil, desde donde se extendió a todas las tierras con clima apropiado para su producción.

Por su riqueza en ácidos (málico, palmítico, p-cumárico y mirístico), vitamina C y especialmente, por su alto contenido en vitamina A; el mango constituye una buena fuente de antioxidantes; lo que otorga un poder defensivo contra la degradación de las células. Los mangos ejercen una función anticancerígena muy efectiva otorgada tanto por estas vitaminas como por su riqueza en flavonoides, entre los que destaca la quercetina y el camferol. Además, estos componentes guardan una estrecha relación con la reducción de los niveles de colesterol y la disminución de la hipertensión. Para un adulto, un mango mediano proporciona mucho más de la cantidad necesaria diaria de vitamina A, en forma de carotenos, que son mayormente los que le confieren a la pulpa su particular coloración amarillenta o rojiza. Una pieza de un peso aproximado de 200 g contiene unas 8000 UI de vitamina A, lo que representa un 60% más de la dosis diaria

recomendada. Solamente los melones de la variedad “*cantaloup*” poseen mayor cantidad de este componente (Torres J, 2007).

Presenta asimismo pequeñas cantidades de vitaminas del grupo B, como la tiamina (B1), la riboflavina (B2) y piridoxina (B6), necesarias para el buen funcionamiento del sistema nervioso, la salud de la piel y el cabello, así como para la síntesis de aminoácidos y el metabolismo de las grasas, entre otros. De esta manera, comer mango ayuda, en cierto modo, a prevenir la caída del cabello, alivia o previene los problemas de la piel, la debilidad muscular y los trastornos de origen nervioso (Haro A, 2007). En la tabla 1 se muestra los principales componentes del mango.

Tabla 1. Componentes nutricionales característicos del mango, (valores dados para 100 g de fruta fresca) (USDA 2006).

Componente	Contenido
Agua	81,7 g
Energía	65 kcal
Grasa	0,45 g
Proteína	0,51 g
Hidratos de carbono	17 g
Fibra	1,8 g
Potasio	156 mg
Fósforo	11 mg
Hierro	0,13 mg
Sodio	0 mg
Magnesio	9 mg
Calcio	10 mg
Cobre	0,11 mg
Cinc	0,04 mg
Selenio	0,6 mcg
Vitamina C	27,7 mg
Vitamina A	3,894 UI
Vitamina B1 (Tiamina)	0,058 mg
Vitamina B2 (Riboflavina)	0,057 mg
Vitamina B3 (Niacina)	0,58 mg
Vitamina B6 (Piridoxina)	0,134 mg
Vitamina E	0,100 mg
Ácido fólico	14 mcg

El mercado para mango crece continuamente. Los principales importadores son Estados Unidos, Francia e Inglaterra y seguidos por Holanda y Alemania. En el mundo se producen aproximadamente 14 millones de toneladas por año consumiéndose la mayor parte en los países productores. Entre los países exportadores están Haití, Kenia, India, Alto Volta, Pakistán, Filipinas, Tailandia, México y Brasil; siendo los dos últimos los mayores exportadores. En casi todos los mercados prefieren la fruta de color rojizo, sobre todo de los cultivares Tommy Atkins y Haden, siendo éstas las principales variedades cultivadas en la mayoría de los países exportadores (Mora J et al, 2002).

El mercado de las frutas tropicales deshidratadas en Estados Unidos representa una muy buena oportunidad para el productor y empacador de mango fresco; ya que se pueden aprovechar las mermas que se tienen tanto en el campo como en el empaque debidas a

mangos frescos que no cumplen con las características de exportación; se le da así un valor agregado a la producción y se minimizan pérdidas. Estados Unidos en los últimos 6 años ha importado un total de 850 toneladas métricas de mango deshidratado por un valor de \$3.4 millones de dólares. Otro nicho de mercado interesante es el Reino Unido (R.U.) que importa 100 toneladas métricas de mango deshidratado al año, por un valor de \$ 500,000 dólares. Según la información de una de las más grandes empresas importadoras de Londres, la "CommunityFoods of London", el mango deshidratado tiene especialmente una gran oportunidad de crecimiento debido a que los mercados europeos, en su mayoría, son relativamente inexplorados (Mora J et al, 2002).

Las tendencias relevantes para el mango deshidratado y las demás frutas tropicales, en el ámbito mundial, es la siguiente:

Estados Unidos (E.U.) continua con una tendencia a la alza en la importación del mango deshidratado, pero al mismo tiempo, mientras que el mango deshidratado ha incrementado su consumo, las importaciones de frutas deshidratadas convencionales como el coco y la papaya se vieron reducidas en términos de valor. El plátano lo incrementó levemente.

En Europa el mercado es muy interesante pero un tanto difícil debido a que está relativamente inexplorado. Las importaciones, especialmente de mango y papaya deshidratada, tienen buenas oportunidades de crecimiento. El coco y el plátano deshidratados fueron los primeros en demostrar que el negocio de la fruta deshidratada era rentable a pesar de que los mercados son extremadamente competidos (Mora J et al, 2002).

4.2. CARACTERISTICAS DEL SECADO

En general, secado significa aplicación de calor bajo condiciones controladas de presión, temperatura, velocidad de aire de secado, entre otros, para remover por evaporación la mayor cantidad de agua presente en los alimentos, permite minimizar el deterioro microbiano y las reacciones que tienen lugar.

Cuando un alimento es deshidratado no solo se disminuye el contenido de agua sino también el agua ligada. La primera sería la única disponible para el crecimiento de los microorganismos y para intervenir en las reacciones químicas que tienen lugar durante las transformaciones del alimento.

Los equipos de secado pueden clasificarse en: secaderos en los que el sólido se encuentra directamente expuesto a un gas caliente (generalmente aire), y secaderos en

los que el calor es transmitido al sólido desde un medio externo tal como vapor de agua condensante, generalmente a través de una superficie metálica con la que el sólido está en contacto (McCabe et al, 1991).

El mecanismo de secado convectivo con aire consiste en hacer pasar el aire caliente sobre el alimento húmedo, el calor es transferido a la superficie, y el calor latente de vaporización causa la evaporación del agua. El vapor de agua se difunde a través de la película para posteriormente llegar a la corriente de aire. Esto genera una región de baja presión de vapor de agua en la superficie del alimento y un gradiente de presión de vapor de agua entre el contenido de humedad en el interior del alimento y el aire seco. Este gradiente provoca una fuerza impulsora para remover el agua del alimento (Rahman, 1999).

El secado es un proceso complejo que implica al mismo tiempo, transferencia calor y de masa de forma transitoria. Para la optimización, el diseño y la determinación de los parámetros del proceso, se debe tener en cuenta la transferencia de calor y masa en el producto durante el secado. Los parámetros que influyen en el comportamiento del secado pueden ser externos o internos. Los parámetros externos incluyen la temperatura, la velocidad y la humedad relativa del medio de secado (aire), mientras que los parámetros internos incluyen la densidad, la capacidad de permeabilidad, la porosidad, las características de absorción-desorción y las propiedades termo-físicas de los materiales a secar (Kaya, et al., 2009).

4.3. SECADOR ASISTIDO CON BOMBA DE CALOR

Este es un tipo especial de deshidratador por convección a bajas temperaturas, consiste en una cámara para secado convencional al cual se le ha agregado un circuito de refrigeración-calefacción, llamado bomba de calor. Su funcionamiento es de manera similar a un refrigerador de uso doméstico.

El secador consiste de un circuito frigorífico (condensador, evaporador y fluido refrigerante R-22), válvula de expansión, compresor, depósito de líquido y una cabina de deshidratación. La regulación de la humedad relativa y velocidad del aire se realiza por medio de un tablero electrónico. La bomba de calor junto con el producto esta herméticamente cerrado y aislado.

Para entender el funcionamiento de este sistema se hace necesario recordar uno de los principios fundamentales de termodinámica: el calor se transfiere de un medio de mayor temperatura a un medio de menor temperatura (Cengel, 2006).

El fluido refrigerante a baja temperatura y presión ingresa al evaporador, donde se evapora absorbiendo la energía en forma de calor latente del aire circulante en el secador (debido a que este se encuentra más frío), el refrigerante como vapor pasa por el compresor y se comprime hasta la presión del condensador (por consiguiente aumentando su entalpia) y lo descarga como vapor sobrecalentado y se enfría ingresando al condensador, cediendo su calor al aire del proceso de secado. Después entra al tubo capilar donde su presión y temperatura caen de forma drástica debido al efecto del estrangulamiento, volviendo a sus condiciones iniciales y se completa el ciclo cuando el refrigerante vuelva a entrar al compresor (Cengel, 2006). El aire del sistema de secado que se ha calentado en el condensador pasa a través de la cámara donde retira calor latente de las muestras y a la salida de la cámara reinicia el ciclo cediendo calor latente en el evaporador.

Esta técnica permite controlar una cámara de secado en circuito cerrado sin necesidad de tomar aire exterior, ya que la fuente de calor es el aire húmedo que se extrae del producto obteniendo un considerable ahorro energético y evitando las emisiones gaseosas.

El sistema es totalmente de recirculación (figura 1) que conduce a una eficiencia térmica cercana al 100%. Las tres principales ventajas del SBC son:

- Alta eficiencia energética, se recupera el calor sensible y el calor latente de vaporización.
- El secado puede llevarse a cabo a bajas temperaturas
- El secado puede llevarse a cabo independiente de la temperatura ambiente y las condiciones meteorológicas.

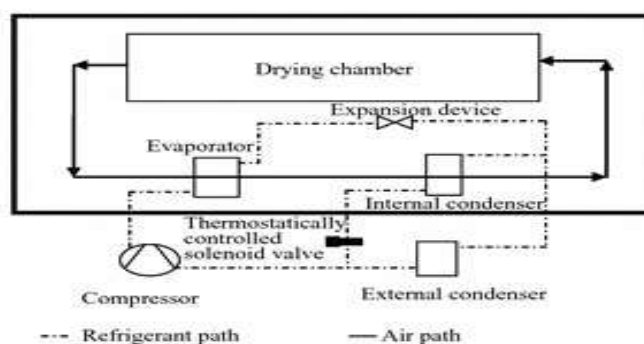


Figura 1. Representación del proceso de SBC. Fuente (Paul, 2009)

4.4. PROPIEDADES FISICOQUIMICAS

4.4.1. Actividad de agua

El agua contenida en un alimento, sea de origen animal o vegetal, está más o menos "disponible" para participar en las reacciones físicas, químicas y microbiológicas. Esta "disponibilidad" varía de un producto a otro según su composición, algunas estructuras o moléculas retienen más agua que otras; varía incluso para un mismo producto, un fruto maduro no se comporta de la misma forma que un fruto verde.

La mejor forma de expresar esta "disponibilidad", es decir el "grado de libertad" del agua de un producto, es la relación entre la presión parcial de agua en el alimento (p) y la presión de vapor del agua pura (p_o) a la misma temperatura.

La relación que se tiene en la Ec. (1) define la actividad de agua en el producto y su relación con la humedad relativa de equilibrio (% HRE) del medio.

$$a_w = \frac{p}{p_o} = \%_{100}^{HRE} \text{ Ec. (1)}$$

4.4.2. Color

La evaluación de color en los alimentos es un tema de gran interés en la industria alimentaria y se puede hacer visual o instrumental.

En el caso de las frutas y vegetales el color depende de la presencia de cuatro tipos fundamentales de pigmentos, carotenoides, antocianinas, clorofilas y compuestos fenólicos, los cuales pueden cambiar durante el proceso de secado.

Por otra parte, en ciertos alimentos la aparición de coloraciones marrones frecuentemente indeseadas, se asocia a reacciones de pardeamiento no enzimático (reacción de Maillard, propiciada por las altas temperaturas), pardeamiento de tipo enzimático y el producido por la caramelización de los azúcares, en la superficie del alimento. Todo esto puede afectar en forma negativa a la presentación y el sabor de los productos (Guerrero y Núñez, 1991).

La CIE (Comisión Internacional d' Eclérage) o Instituto Internacional del color recomendó en 1976 el espacio de color CIEL*a*b*, adoptado también como norma UNE. Este espacio es un sistema coordinado cartesiano definido por tres coordenadas colorimétricas L*, a*, b*, magnitudes que derivan matemáticamente de los valores de las coordenadas triestímulo. A partir de estas coordenadas es posible definir las magnitudes colorimétricas tono y saturación o croma (Hunt, 1998).

El cambio de color total (ΔE) es la diferencia de color que permite medir los cambios de matiz y densidad. En la Ec. (2) se describe matemáticamente la solución de este parámetro.

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_{j} - L^*_{i})^2 + (a^*_{j} - a^*_{i})^2 + (b^*_{j} - b^*_{i})^2} \quad \text{Ec. (2)}$$

Dónde:

ΔE : cambio de color total

a^* : tonalidad del rojo (+ a^*) a verde (- a^*)

b^* : tonalidad del amarillo (+ b^*) a azul (- b^*)

i : muestra inicial

j : muestra tratada

4.4.3. Volumen

El método de secado y las condiciones de este tienen un efecto significativo sobre las características del alimento como la porosidad, la contracción o cambio de volumen, y la densidad aparente.

Cuando el agua es removida del material, se produce un desequilibrio en la presión entre el interior del material y la presión externa, lo cual genera la contracción o colapso del material (Carrillo, 2008)

Es muy importante que el alimento no sufra daños en su matriz, si su estructura porosa se conserva habrá poco o nada de contracción, lo que facilitará la reconstitución de los productos deshidratados al igual que su velocidad de rehidratación.

Datos experimentales mostraron que el cambio de volumen y la porosidad pueden estar relacionados principalmente en función del contenido de humedad para diferentes variedades de productos alimenticios (BanuKoç, et al., 2007).

Lozano et al., (1980) describieron el comportamiento de contracción de manzanas como función de contenido de humedad durante el secado como un modelo lineal. Sin embargo en muchos estudios se ha concluido que los modelos empíricos no lineales podrían describir el comportamiento de una manera más adecuada para frutas y verduras (BanuKoç, et al., 2007).

4.4.4. Vitamina C

La vitamina C (nombres químicos: ácido ascórbico y ascorbato) es una sustancia cristalina blanca que es altamente soluble en agua. La estabilidad del ácido ascórbico es afectada por diversas condiciones ambientales, tales como, la luz, el oxígeno, la actividad de agua y la temperatura (Fennema 1993).

Las principales fuentes de vitamina C en la mayoría de las dietas son las frutas, verduras y hortalizas. Los plátanos y bananos son los únicos alimentos básicos comunes que contienen cantidades razonables de vitamina C. Las hortalizas de raíz y papas contienen cantidades pequeñas pero útiles. Productos de origen animal como la carne, el pescado, la leche y los huevos contienen pequeñas cantidades.

Como la vitamina C se destruye fácilmente por el calor, la cocción prolongada de cualquier alimento puede destruir gran parte de la vitamina C presente.

Las opiniones sobre las necesidades humanas son muy diferentes. Parece claro que es necesario tanto como 75 mg por día si el cuerpo debe permanecer totalmente saturado con vitamina C. Sin embargo, los individuos parecen mantenerse saludable en ingestas tan bajas como 10 mg por día. Una recomendación de 25 mg para un adulto, 30 mg para los adolescentes, 35 mg durante el embarazo y 45 mg durante la lactancia parece ser un compromiso razonable (FAO, 2001).

4.4.5. Rehidratación

La rehidratación es un proceso complejo dirigido a restaurar las propiedades estructurales originales del material fresco (previo al secado o deshidratar) poniendo en contacto el producto seco con agua. No obstante se ha demostrado que la habilidad de rehidratación presenta una histéresis debido a la disrupción estructural y celular que tiene lugar durante el proceso de deshidratación (Krokida, 2003).

Un criterio para juzgar la calidad de los alimentos deshidratados es que cuando se les reconstituye mediante la adición de agua, sean muy parecidos o casi indistinguibles del material alimenticio original (Navarro M, 2007)

Entre las propiedades de calidad más importantes de un alimento que ha sido rehidratado, están las propiedades estructurales (densidad, porosidad, tamaño poro, volumen específico), ópticas (color y apariencia), texturales (fuerza de compresión, relajación, tensión), mecánicas (estado del producto: cristalino, elástico, vítreo), propiedades sensoriales (aroma, sabor, color) y propiedades nutricionales (contenido de vitaminas, proteínas, azúcares, entre otras). La evaluación de todas o alguna de estas

propiedades depende de los parámetros a considerar para un mercado específico. Las características de calidad de un alimento que ha sido rehidratado pueden mejorarse aplicando pretratamientos antes del proceso de secado, por ejemplo inmersión en soluciones azucaradas, salinas (NaCl) o ácidas (ácido cítrico y/o ascórbico), escaldado, deshidratación osmótica, microondas, entre otros (Marín E et al, 2006).

4.5. ANTECEDENTES

4.5.1. Trabajos de secado de mango y otras frutas

Ochoa et al (2012), compararon el efecto de secado de mango entre dos tecnologías diferentes (ventana de refractancia a una temperatura de proceso de 92°C y secador de bandeja a una temperatura de proceso de 62°C y una velocidad de aire de 0,52 m/s) sobre los parámetros de actividad de agua, cambio de color y cinéticas de secado para muestras de 1 y 2 mm de espesor. Finalmente, se evidenció que el tiempo requerido por la ventana de refractancia para llegar a un contenido de humedad de 5% es reducido por un factor de 4 (para muestras de 2 mm) o 8 (para muestras de 1 mm) con respecto al tiempo requerido para secar muestras en un secador de bandejas. También se evidenció que el cambio de color en el producto fue similar en ambas técnicas de secado y solo en algunos casos fue menos en la ventana de refractancia.

Zuluaga et al (2010), estudiaron la influencia del proceso (secado con aire caliente y deshidratación osmótica más secado con aire caliente) a temperaturas de secado (60 y 70 °C) sobre las características físicas del mango Tommy Atkins: humedad final, actividad de agua, fuerza de fractura, color y rehidratación. Se concluyó que las muestras sin pretratamiento a 70°C presenta una mayor velocidad de eliminación de agua del interior de la fruta, la menor humedad final (10,2%) y la menor actividad de agua (0,362), mientras que las muestras con pretatamiento presentaron una menor velocidad en la eliminación del agua desde el interior de la fruta durante el proceso de secado, la mayor humedad final (14% - 15%) y la mayor actividad de agua (0,612), esto demuestra que los procesos de secado con osmo-deshidratación como pretratamiento son más lentos debido a la formación de una capa de jarabe en la superficie de las muestras, la cual dificulta la salida de la humedad del interior del mango. Respecto a la rehidratación se evidenció un mayor coeficiente de rehidratación (RC) en las muestras secadas con aire caliente sin pretratamiento debido a que las muestras osmodeshidratadas y sometidas a secado presentan una menor porosidad.

4.5.2. Trabajos de secado de alimentos con bomba de calor

Sobre la deshidratación del mango se encuentran muchos estudios donde se evalúan las características fisicoquímicas en general por diferentes métodos, pero se encuentra muy poco sobre el secado de este producto con secador de bomba de calor. A continuación se mostrarán algunos estudios realizados sobre alimentos usando bomba de calor (SBC).

Teeboonma et al., (2003), analizaron la optimización del secado con bomba de calor teniendo en cuenta el aire de derivación, las tasas de flujo de aire y la temperatura del aire de secado, utilizando los modelos matemáticos de la papaya y mango, estos modelos matemáticos fueron desarrollados y validados experimentalmente con muestras del mismo diámetro y diferente espesor. El criterio óptimo del proceso es el mínimo costo –anual total por unidad de evaporación de agua. Finalmente encontraron que las condiciones óptimas para ambos productos no son similares, además las propiedades físicas del producto afecta, significativamente la tasa de flujo de aire óptimo y el aire de derivación del evaporador.

Rogeles L y Saldaña J (2011), analizaron los parámetros fisicoquímicos (color, encogimiento, actividad de agua y contenido de carotenos) de muestras de zanahoria deshidratadas con un secador asistido con bomba de calor, el cual permite a humedades relativas de aire suministradas controlar la temperatura de secado. Experimentalmente utilizaron muestras de espesor (mm) de 2, 3 y 4, HR (%) de 20, 35 y 50 y velocidad del aire (m/s) de 0.8, 1.0 y 1.2. Estadísticamente se evidenció que la velocidad con que se trabajó, no afecta los cambios en las variables de repuesta mientras que el espesor influye en el contenido de humedad y en el encogimiento, mientras que la HR influye la cantidad de provitamina A y actividad de agua.

Phoungchandand et al., (2010), estudio la deshumidificación asistido por medio de bomba de calor usando muestras de 2mm de espesor de jengibre, el secado se llevó en dos etapas, con el fin de retener al máximo el contenido de 6-gingerol, facilitar la rehidratación y minimizar las pérdidas de color. La temperatura utilizada en el secador de bandejas fue de 70 °C y en la bomba de calor de 40, 50 y 60 °C, la velocidad fue regulada a 0.5 m/s. Para las isotermas los modelos que mejor se ajustaron fue el de Halsey y Oswin modificado, el modelo de Page fue el más efectivo para describir la transferencia de masa, la constante de secado K se obtuvo por el modelo de Arrhenius. El secador con bomba de calor a una temperatura de 40 °C redujo en 59.32% el tiempo de secado y aumentó en un 6% el contenido del 6-gingerol por lo que éste presentó las mejores cualidades en rehidratación y pérdidas de color.

Mustafa et al. (2008), evaluó las cinéticas de secado en manzanas deshidratadas mediante un secador con bomba de calor y un secador solar. Para un contenido de humedad inicial de 4.8 (g agua/g ss) durante 3 horas de secado, las muestras de manzana con el SBC obtuvieron un contenido de humedad de 0.18 (g agua/g ss) mientras que para el mismo periodo con el secador solar alcanzó 1.0 (g agua/g ss). Concluyendo que el SBC reduce el tiempo de secado, economiza el uso de la energía y no se ve influenciado por las condiciones ambientales como sucedió con el secado solar, arguyendo que es eficiente el uso del SBC.

5. MATERIALES Y METODOS

5.1. Materia prima

Se utilizaron mangos (*Mangifera indica L.*) de la variedad Tommy Atkins, con contenido de °Brix que variaron entre 11 y 13 (NTC 5210).

5.2. Preparación de unidad experimental

Las frutas (mango tommy) lavadas se pelaron y cortaron en rebanadas paralelas (axial) a la semilla de la fruta con una tajadora calibrada en 2 mm, y mediante un sacabocados en acero inoxidable se sacaron (rodajas) de 27 mm de diámetro y 2 mm de espesor.

5.3. Diseño experimental

Los experimentos se llevaron a cabo por duplicado realizando utilizando un diseño factorial balanceado 2 x 3 (Tabla 2), teniendo como factores humedad relativa (10, 20 y 40 %) y velocidad de aire (0,8 y 1,2 m/s). Las variables de respuesta fueron: contenido de humedad (cinéticas de secado), actividad de agua (a_w), volumen (V), parámetros de color L^* , b^* y ΔE . El contenido de humedad de cada tratamiento se midió a diferentes tiempos de secado (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420 y 450 min) para un total de 20 tiempos. Las variables de respuesta a_w , V y color fueron medidas a (0, 30, 60, 120, 180, 210, 300, 360 y 420 min), mientras que la capacidad de rehidratación y el contenido de vitamina C se determinaron a un contenido de humedad aproximado a 3.0 %, (b.s) para poder evaluar los cambios entre tratamientos.

Tabla 2. Diseño experimental del proceso de secado de mango por SBC

Factores de proceso	Niveles	VARIABLES DE RESPUESTA
Humedad Relativa (%)	10	Contenido de humedad Actividad de agua (a_w) Color (L^* , b^* , ΔE) Volumen (V)
	20	
	40	
Velocidad de aire (m/s)	0,8	
	1,2	

Adicionalmente, se calcularon los coeficientes de difusión efectivo (D_{ef}) de cada tratamiento y la energía de activación (E_a). Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) empleando el programa estadístico Minitab 16 con intervalo de confianza de 95%.

5.3.1. Modelo estadístico

El modelo estadístico se describe mediante la Ec. (3).

$$Y = \mu + \tau_i + \gamma_j + (\tau\gamma)_{ij} + \epsilon_{ijk} \text{Ec. (3)}$$

Donde:

τ_i : Efecto debido a la i -ésima humedad relativa

γ_j : Efecto debido a la j -ésima velocidad del aire

$(\tau\gamma)_{ij}$: Efecto debido a la interacción entre la i -ésima humedad relativa con la j -ésima velocidad del aire.

5.4. Determinación de las propiedades fisicoquímicas

5.4.1. Contenido de humedad

Se determinó mediante el método AOAC, (1980), sacando las muestras a un horno a 60 °C hasta peso constante, para ello se utilizó una balanza analítica (Metler AE200, USA) de sensibilidad 0.001.

5.4.2. Actividad de agua

Se determinó por medio de la lectura de un higrómetro con punto de rocío (Decagón CX-1, USA) con una sensibilidad de 0,001. Para la calibración del equipo se utilizaron sales de 0.25, 0.50 y 0.954 de a_w .

5.4.3. Color

El análisis del color se realizó a través del espectro de reflexión entre 400-780 nm por medio de un espectro colorímetro (Hunter Lab, USA) utilizando como referencia el

iluminante D65 y el observador 10° para obtener las coordenadas de color CIE-L*, b*, donde b* indica la variación amarillo/azul y L* luminosidad blanco/negro.

5.4.4. Volumen

El volumen se calculó a partir de la densidad aparente, se determinó con un picnómetro mediante el método de desplazamiento de volumen con un picnómetro.

La densidad aparente se determinó mediante la ecuación 4 y el volumen con la ecuación 5.

$$\rho_a = \frac{m_t}{m_t + m_p - m_{p+mt}} \times \rho_l \quad \text{Ec. (4)}$$

$$\rho = \frac{m_t}{V} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde: ρ_a =densidad aparente de la muestra (g/cm³), ρ_l =densidad del líquido patrón (agua) (g/cm³), m_t =peso de la muestra en cada tiempo (g), m_p =peso del picnómetro con agua y m_{p+mt} = peso del picnómetro con agua y muestra.

5.4.5. Rehidratación

Adicionalmente se realizó un proceso de rehidratación donde se tuvo en cuenta la HR más baja (10%) a dos condiciones de velocidad de aire (0,8 m/s y 1,2 m/). Se emplearon muestras con un contenido de humedad cercana a 3.0 % b.s. La rehidratación se realizó a distintos tiempos (2, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 30, 60 y 90 min). Las muestras se sumergieron en recipientes con una relación peso muestra: peso agua destilada de 1:15. Para el cálculo de la capacidad de rehidratación, las muestras se pesaron antes y después del proceso de rehidratación.

El desempeño de la rehidratación se evaluó mediante el coeficiente de rehidratación (COR), como se muestra en la Ec. (6)

$$COR = \frac{m_{rh}(100 - X_o)}{m_{dh}(100 - X_{dh})} \quad \text{Ec (6)}$$

Donde: m_{rh} =masa de la muestra rehidratada (g), m_{dh} =masa de la muestra deshidratada (g); X_{dh} = contenido de agua de la muestra al final del secado (% base húmeda); X_0 = contenido de agua de la fruta fresca, previo al secado (% base húmeda).

5.4.6. Vitamina C

El contenido de vitamina C se determinó en muestras de mango deshidratadas con un contenido similar de humedad de 3.0 % (b.s) a tres tratamientos, a HR más baja (10%) en los dos niveles de velocidad de aire $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, y a HR=40% y $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Este análisis se determinó por el método de volumétrico en el laboratorio de análisis industriales, del departamento de Química de la Universidad del Valle.

5.5. Modelamiento de cinéticas de secado

Los valores experimentales de las cinéticas de secado se ajustaron mediante los modelos de Newton, Page y Henderson-Pabis, ecuaciones 7, 8 y 9 respectivamente.

$$\text{Modelo de Newton} \quad MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k_1 t) \quad \text{Ec. (7)}$$

$$\text{Modelo de Page} \quad MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k_2 t^n) \quad \text{Ec. (8)}$$

$$\text{Modelo Henderson-Pabis} \quad MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = a \cdot \exp(-k_3 t) \quad \text{Ec. (9)}$$

Estos modelos empíricos se derivan de una relación directa entre el contenido de humedad promedio y el tiempo de secado, además de estar fuertemente relacionados con el modelo difusional de la segunda ley de Fick (Akpinar, 2005).

Donde MR=relación de humedad adimensional, considerada como la fuerza impulsora, X_t =contenido de humedad para un tiempo determinado (bs), X_e =contenido de humedad en equilibrio (bs), X_0 =contenido humedad inicial (bs), k_1 , k_2 , k_3 , a y n son parámetros del modelo y t =tiempo de secado. El valor del contenido de humedad en equilibrio es relativamente pequeño en relación con X_t así MR se simplifica a la ecuación Ec (10).

$$MR = \frac{X_t}{X_0} \quad \text{Ec. (10)}$$

5.5.1. Coeficiente de difusión y energía de activación

La difusividad efectiva de agua (D_{ef}) se determinó en estado no estacionario mediante la ecuación integrada de la segunda ley de Fick (Vega et al, 2005). El modelo difusional de Fick considera que el transporte de agua desde el interior del sólido hacia la superficie del mismo tiene lugar principalmente por difusión.

Asumiendo una distribución uniforme de humedad inicial y en ausencia de resistencias externas, y teniendo en cuenta que la geometría cilíndrica del mango con espesor relativamente despreciable en comparación con el radio y despreciando los bordes laterales, se asume una geometría de lámina semi-infinita de espesor l , entonces la solución analítica para la segunda Ley de Fick, sería:

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \times \exp(-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{D_{ef}}{L^2} \cdot t) \quad \text{Ec. (11)}$$

La ecuación (11) se puede truncar a un solo término por la convergencia de la serie, la ecuación (12) representa el primer término de la serie.

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{\pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{4 L^2}\right) \quad \text{Ec. (12)}$$

Para observar si existe influencia de la temperatura de secado sobre la difusividad del agua desde el interior del producto hacia la superficie del mismo, se aplicó la ecuación de Arrhenius Ec (13) con la cual se puede obtener la energía de activación (E_a), que representa la energía para iniciar la reacción de difusión.

$$D_{ef} = D_o e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde D_{ef} =difusividad efectiva del agua (m^2 / s), D_o =factor de Arrhenius (m^2 / s), E_a =energía de activación (kJ/mol), T =temperatura absoluta de secado (K) y R =constante universal de los gases (8.314 J/mol K).

5.6. Análisis estadístico

El ajuste de los modelos cinéticos se realizó mediante regresión no lineal, utilizando la aplicación Excel 2010, haciendo uso del método de mínimos cuadrados y la herramienta solver. Para evaluar la bondad del ajuste del modelo a los datos, se tuvo en cuenta el coeficiente de determinación (R^2) y el valor de chi cuadrado reducido (χ^2).

Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) mediante el programa estadístico Minitab 16.

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1. Cinéticas de secado

El ANOVA (anexo1) evidencio un efecto significativo ($P < 0.05$) del factor HR sobre las cinéticas de humedad, mientras que el factor velocidad no evidencio este efecto ($p > 0.05$). La interacción entre estos factores si mostró un efecto significativo ($p < 0.05$). En las figuras 2 y 3 se muestran los efectos de la HR y velocidad de secado del aire sobre las cinéticas de secado de muestras de mango. El CH inicial de muestras de mango fresco en todos los lotes de proceso fue de $5.298 \pm 0.368 \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{ss}}$.

6.1.1. Efecto de la humedad relativa

Para para las velocidades de aire 0.8 y 1.2 m/s, se observó que a menor valor de HR mayor es la pérdida de humedad de las muestras de mango durante el proceso de secado por bomba de calor. Lo cual indica que se requiere menor tiempo de secado a menor valor de HR.

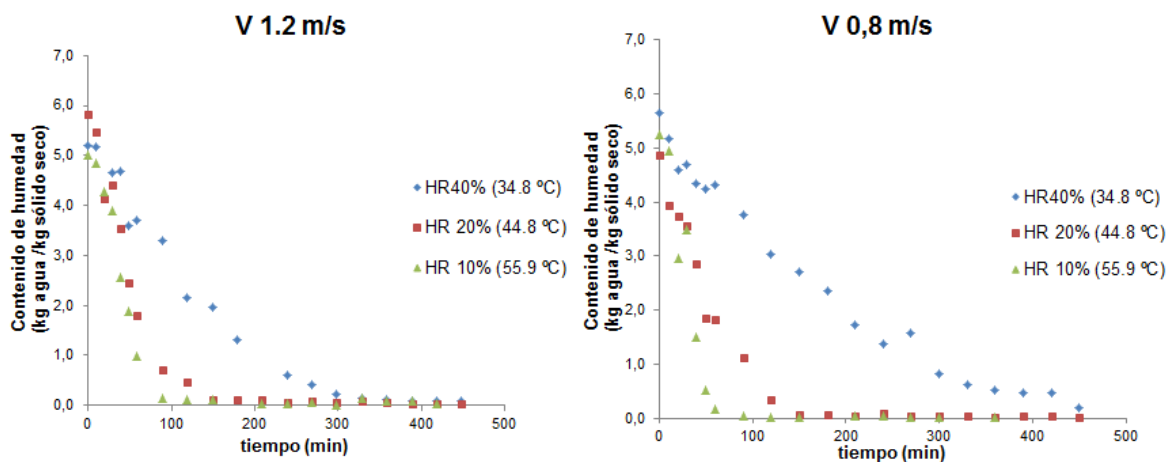


Figura 2. Efecto de la humedad relativa sobre las cinéticas de secado de mango en el SBC

Este comportamiento puede ser por: a menor HR más “seca” es la atmosfera del aire de secado y por ende a menor presión de vapor de agua (PV_{agua}), la presión de vapor del ambiente es inferior a la presión de vapor de agua presente en la superficie del alimento (PV_{alimento}), provocando mayor transferencia de agua desde el interior del alimento hacia el exterior, por consiguiente el secado es más rápido. Por otro lado, teniendo en cuenta las propiedades psicométricas del aire, a medida que disminuye la HR del aire se incrementa la temperatura de bulbo seco, generando un incremento de la transferencia

de calor. Este comportamiento ha sido observado en el secado de frutas como papaya (El-Aouar et al., 2003), berenjena (Ertekin y Yaldiz, 2004) y banano (Thuwapanichayanan et al., 2011).

El ANOVA (anexo1) corroboró los resultados anteriores, evidenciando un efecto significativo ($p < 0.05$) del factor HR sobre las cinéticas de humedad. Adicionalmente, se observó una interacción significativa ($p < 0.05$) entre la HR y el tiempo de secado.

6.1.2. Efecto de la velocidad del aire

En la figura 3, puede notarse que no hay diferencias en las cinéticas de secado en los distintos tratamientos. A pesar, que se observan diferencias visuales entre las cinéticas de secado a HR de 40%, el ANOVA no reportó un efecto significativo en los parámetros evaluados ($p < 0.05$), los valores experimentales presentaron desviaciones estándar altos en cada punto promedio, esto puede ocurrir posiblemente a la poca diferencia (0.4 m/s) de los valores de velocidad evaluados 0.8 y 1.2 m/s, la cual es un limitante del SBC. Fatouh et al., (2005) evidenció que para el secado de hierbas (Jew's) en un SBC las velocidades de aire de 1.2, 1.9 y 2.7 m/s influyeron significativamente ($p < 0.05$) en el contenido de humedad final. Puede observarse para este estudio diferencias superiores (> 0.4 m/s) entre las velocidades del aire respecto al presente trabajo de mango.

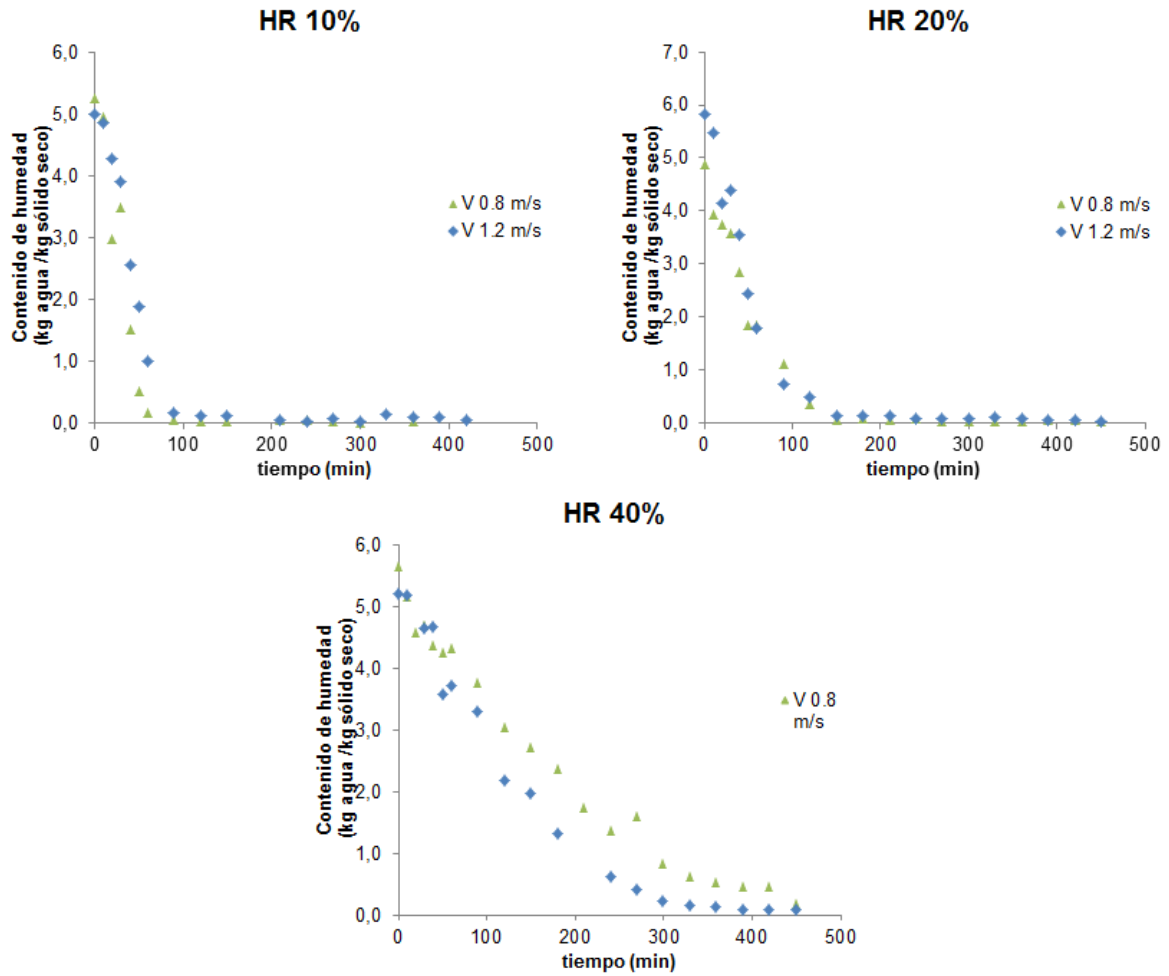


Figura 3. Efecto de la velocidad del aire sobre las cinéticas de secado de mango en el SBC

6.2. Modelamiento de las cinéticas de secado

En la tabla 3 se presentan los parámetros cinéticos del modelamiento de secado en muestras de mango con SBC.

Tabla 3. Parámetros cinéticos de los modelos de Newton, Page y Henderson-Pabis en muestras de mango en el SCB.

Modelo	Constantes y criterio	V 0,8 m/s			V 1,2 m/s		
		10%	20%	40%	10%	20%	40%
Newton	k (m^{-1})	0,0285	0,0164	0,0055	0,0184	0,0167	0,0070
	R^2	0,959	0,981	0,983	0,927	0,970	0,953
	x^2	0,0072	0,0019	0,0017	0,0080	0,0031	0,0051
Page	k (m^{-1})	0,0010	0,0061	0,0041	0,0001	0,0025	0,0010
	n	1,9272	1,2445	1,0591	2,3250	1,4768	1,3965
	R^2	0,972	0,993	0,985	0,997	0,990	0,992
	x^2	0,0030	0,0012	0,0017	0,0004	0,0012	0,0012
Henderson - Pabis	k (m^{-1})	0,0314	0,0170	0,0055	0,0214	0,0183	0,0080
	a	1,1100	1,0322	0,9882	1,1443	1,0800	1,1065
	R^2	0,938	0,983	0,983	0,957	0,978	0,980
	x^2	0,0063	0,0018	0,0016	0,0053	0,0025	0,0027

Se observa que el parámetro k aumenta a medida que se disminuye la humedad relativa para los modelos de Newton y Henderson-Pabis, mientras que para Page el tratamiento a humedad relativa de 10 presentó un resultado no acorde con lo anterior. De acuerdo con la literatura científica, es frecuente que k sea dependiente de la temperatura, de modo que normalmente un incremento de k se relaciona con un aumento en la temperatura del producto durante el proceso (Vega-Gálvez et al., 2011). Teniendo en cuenta que la temperatura aumenta conforme disminuye la HR, estos resultados son similares a los reportados por Vega-Gálvez et al, (2011). El modelo de Page que no presentó el incremento del parámetro k con el aumento de la temperatura, fue también observado por Giraldo et al, (2008), en el secado de pulpa de cupuaçu.

Al comparar los modelos cinéticos, se concluyó que el modelo de Page fue el de mejor ajuste por presentar los valores más altos de coeficiente de correlación (R^2 más cercano a 1) y el valor más bajo del coeficiente x^2 (más cercano a 0). En la figura 4 se presentan las cinéticas de secado por el modelo de Page y experimental, observándose un buen ajuste.

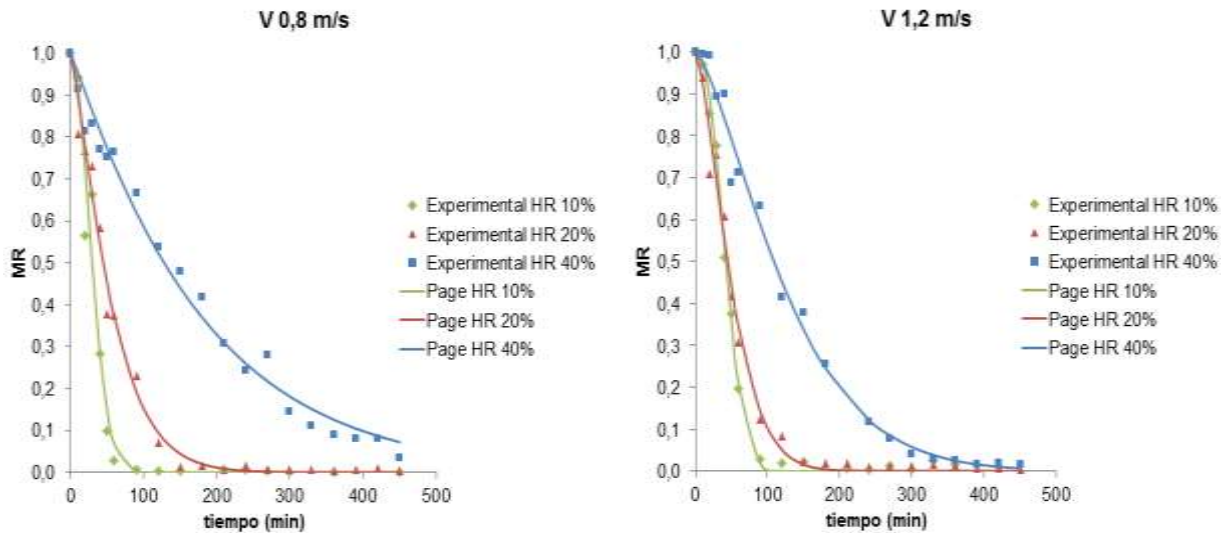


Figura 4. Cinéticas de secado y ajuste por el modelo de Page para humedades relativas y velocidades de aire obtenidas durante el SCB de mango.

6.2.1. Coeficiente de difusión efectiva (D_{ef})

En la tabla 4 se presentan los valores de los coeficientes de difusión efectivo para los diferentes tratamientos.

Tabla 4. Coeficientes de difusión efectiva

Constantes y criterio	V 0,8 m/s			V 1,2 m/s		
	10%	20%	40%	10%	20%	40%
D_{ef} (m^2/s)	5,09E-08	2,76E-08	0,89E-08	3,47E-08	2,97E-08	1,29E-08
R^2	0,94	0,98	0,98	0,96	0,98	0,98

El coeficiente de difusión efectiva se incrementa conforme disminuye la HR para ambas velocidades del aire, sin embargo fueron superiores a mayor velocidad del aire (1.2m/s), excepto para 10% de HR. Al aumentar la velocidad del aire el coeficiente de difusión se incrementó, en este caso se favoreció la transferencia de masa aumentando el número de moléculas que se desplazan hacia la superficie del material que se está secando (Togrul y Pehlivan, 2033). Con respecto al resultado no esperado del tratamiento de HR10%, el cual presentó el mayor valor de difusividad a menor velocidad del aire (0.8 m/s), puede ser explicado por factores del entorno que afectan al proceso de secado, ya que este coeficiente varía según las condiciones del secado y es intrínseca al alimento, englobando los efectos de todos los fenómenos que puedan intervenir en la migración o pérdida de agua. Similar comportamiento reportó Park et al., (2003).

6.2.2. Energía de activación (E_a)

La E_a se calculó linealizando la ecuación (13). La tabla 5 presenta los valores de la E_a y el factor de Arrhenius (D_0) obtenidos para las muestras de mango.

Tabla 5. Energía de activación para el secado de muestras mango

Parámetro	Velocidad del aire (m/s)	
	0,8	1,2
E_a (kJ mol ⁻¹)	66,996	40,793
D_0 (m ² s ⁻¹)	2,46E+03	1,15E-01

Según Falade y Shogaolu, (2010) la E_a para el secado es la energía requerida para iniciar la difusión de masa de agua a partir de un material alimenticio húmedo durante el secado. Las muestras de mango secadas a 0.8 m/s presentó el mayor valor de E_a que a 1.2 m/s, lo que se traduce en un requerimiento mayor de energía para mover las moléculas de agua a medida que disminuye la humedad del alimento. Fito et al., (2001), manifiestan que un valor bajo de E_a en el secado de alimentos, indica mayor facilidad para que emigre el agua del material.

Dissa et al., (2008), reportaron en el secado de muestras de mango (var.Amelie) un valor de E_a de 25.355 kJ/mol, mientras que Ruiz-López (2007) reportaron valores 27 kJ/mol para variedad de mangos mexicanos. La diferencia de valor de E_a comparado con los reportados por Dissa y Ruiz-Lopez puede ser atribuida principalmente a la variedad del mango y a los distintos mecanismos de secado, entre otros. Mientras que Ocampo, (2006), reportó 46.459 kJ mol⁻¹ para mangos var. Tommy Atkins (la misma variedad a la de este trabajo), valor cercano al que se obtuvo experimentalmente en este estudio.

6.3. Propiedades fisicoquímicas

6.3.1. Actividad de agua (a_w)

El ANOVA (anexo 2) evidencio un efecto significativo ($P < 0.05$) para la interacción entre los dos factores sobre la a_w de las muestras de mango. En las figuras 5 y 6 se observa los efectos de la HR y la velocidad del aire sobre la a_w . La a_w inicial promedio de las muestras de mango en estado fresco fue de 0.9826 ± 0.01337 .

6.3.1.1. Efecto de la humedad relativa

La evolución de la a_w en los distintos tratamientos de secado se muestra en la figura 5. Se observa que la a_w disminuye conforme decrece la HR. Lo cual indica que el tratamiento de HR=10% alcanzó los valores más bajos para un mismo tiempo de secado. Todos los tratamientos alcanzaron a_w inferiores a 0.63 al final del secado, excepto el tratamiento HR=40% a 0.8 m/s. Alimentos con valores a_w inferiores a 0.63 son seguros en el almacenamiento, debido a que por debajo de este valor se inhiben las poblaciones microbianas (hongos, bacterias, levaduras) (Shafiur, 2006). Puede notarse que para alcanzar $a_w \approx 0.63$, los tratamientos HR=10% para ambas velocidades (0.8 y 1.2 m/s) necesitan aproximadamente 90 min, mientras que el tratamiento HR 40% a 0.8 m/s se requiere de 360 min y HR 40% a 1.2 m/s 180 minutos. Este comportamiento es coherente con lo analizado en el punto de las cinéticas de secado, en donde la a_w es influenciada por el factor HR.

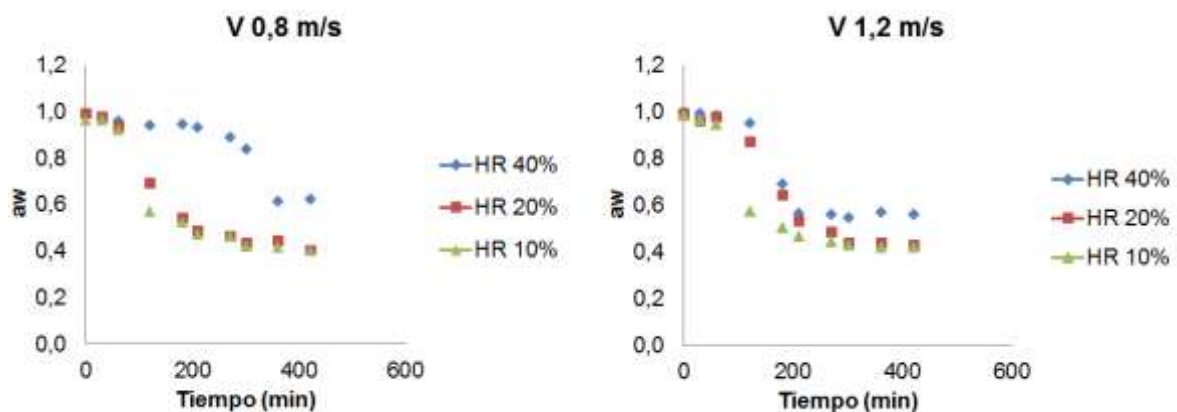


Figura 5. Efecto de la humedad relativa sobre la actividad de agua en muestras de mango.

6.3.1.2. Efecto de la velocidad del aire

En la figura 6 se observa la influencia de la velocidad de aire sobre la a_w .

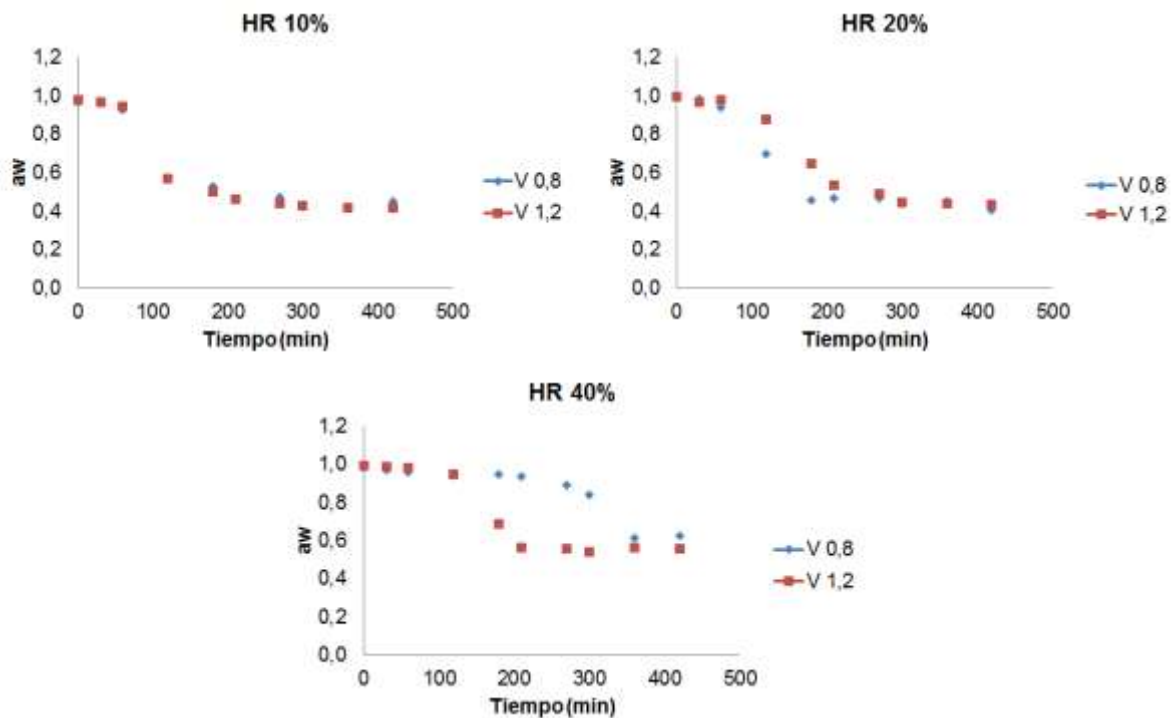


Figura 6. Efecto de la velocidad del aire sobre la actividad de agua en muestras de mango.

La velocidad de aire no mostró un efecto significativo ($p > 0.05$) sobre la a_w , a pesar que se observa una diferencia entre 200 y 300 min para una HR=40%. El ANOVA no reportó significancia, en general las dos curvas de velocidad se comportaron de manera similar para cada humedad relativa.

6.3.2. Color

6.3.2.1. Luminosidad (L^*)

La figura 7 representa la variación o el comportamiento de L^* (Luminosidad) durante la deshidratación del mango tommy.

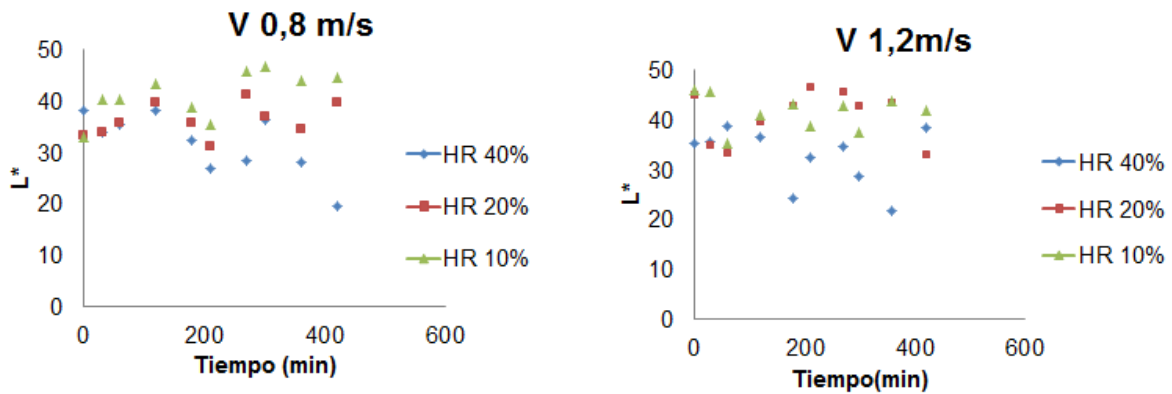


Figura 7. Efecto de la humedad relativa en la luminosidad de muestras de mango.

El parámetro L^* representa el nivel de claridad u oscuridad de un alimento. Se observa que las muestras sometidas a humedades relativas bajas (altas temperatura) presentan un incremento en la luminosidad durante el tiempo de proceso, siendo más notorio a 0.8 m/s, mientras que cuando se someten a la humedades relativa alta (bajas temperatura) la luminosidad decrece durante el transcurso del proceso. Zou et al (2012), presentaron comportamiento y valores similar al secar muestras de mango con pretratamiento de deshidratación osmótica con aire caliente a 50°C, al final del secado obtuvieron un valor de $L^* = 47.4$, valor cercano al obtenido en este experimento a HR 10% (55,8°C) $L^* = 44,07$.

El análisis estadístico ANOVA (anexo 3) evidenció un efecto significativo ($p < 0.05$) de la humedad relativa sobre L^* corroborando lo anterior.

6.3.2.2. Parámetro (b^*)

El cambio del parámetro de b^* es muy importante para el caso deshidratación de mango ya que este representa la variación de ($-b^*$) azul a ($+b^*$) amarillo. El ANOVA mostró que b^* está influenciado por el factor HR ($p < 0.05$) (anexo 4); notándose que a mayor HR se disminuye b^* , siendo el tratamiento de HR 40% el que presenta los menores valores al final del secado. Estos resultados indican que la muestra de HR 40% es menos amarilla o menor pureza de color amarillo que las muestras de 10 y 20 de HR.

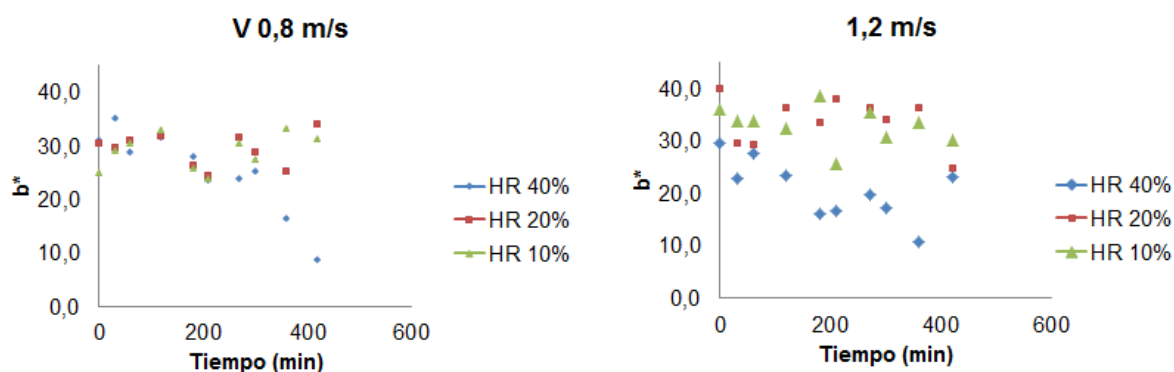


Figura 8. Efecto de la humedad relativa y velocidad de secado sobre el parámetro b^*

Chong C (2013), estudiaron los cambios de color de algunas frutas deshidratadas con la combinación de diferentes métodos (bomba de calor, aire caliente, aire caliente más microondas y bomba de calor más microondas) reportaron que, a unas condiciones de HR 20% y con un contenido de humedad en equilibrio, el tratamiento donde se encontró un el mejor valor de b^* fue bomba de calor más microondas $b^* = 41,21$ mientras que con solo bomba de calor $b^* = 34,27$, valor que se acerca a los encontrados en este trabajo bajo las mismas condiciones de HR y velocidad de aire 0,8 m/s , $b^* = 34,037$.

6.3.2.3. Cambio de color ΔE

El ΔE representa la diferencia total del color para las muestras en los diferentes tratamientos figura 9, estos cambios de color están influenciados por los cambios de L^* y b^* mencionados anteriormente.

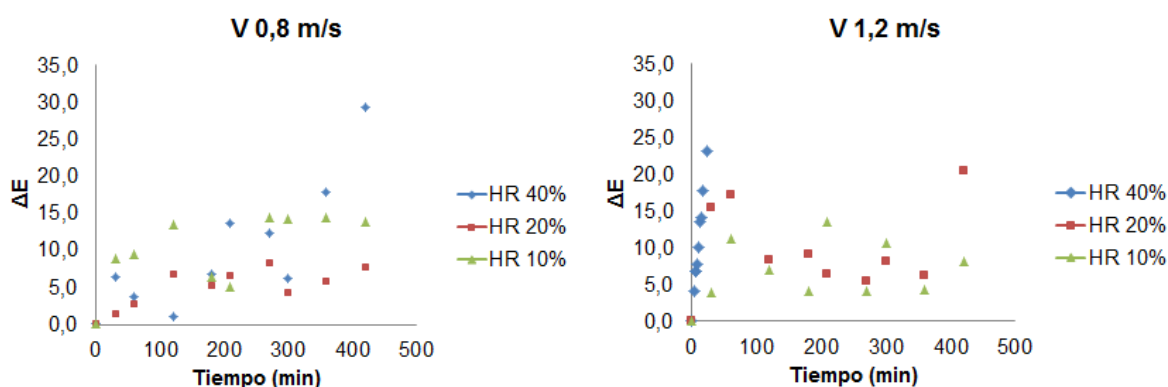


Figura 9. Variación del parámetro (ΔE) a dos velocidades de aire.

En el ANOVA (anexo 5) se observan los valores P que determinan los efectos de cada uno de los factores, mostrando que no hay significancia estadística ($P > 0.05$) de ninguno

de los factores de estudio. Este comportamiento pudo ser influenciado por la alta variación de la desviación estándar. Barreiro et al. (1997) señala que la diferencia del color aumenta con la temperatura del aire de secado y Chong et al. (2013) evidenciaron que en el mango el efecto de la actividad polifenol oxidasa no fue tan significativa en comparación con otras frutas analizadas (papaya, manzana y pera) usando técnicas de secado similares, esto podría ser debido al contenido de ácido ascórbico propio de la fruta, ya que, este compuesto puede impedir la decoloración de la enzima de la fruta mediante la reducción de la oxidación de o-quinonas a difenoles.

El aumento del color en el mango puede ser atribuido al efecto propio de la deshidratación que aunque causa pérdida de carotenos, también implica la concentración de los otros compuestos que a su vez causan aumento del color en el alimento.

6.3.3. Volumen o encogimiento

Para el volumen, el ANOVA (anexo 6) presentó interacción entre los factores velocidad del aire y humedad relativa ($P < 0.05$). La figura 10 representa el comportamiento del volumen.

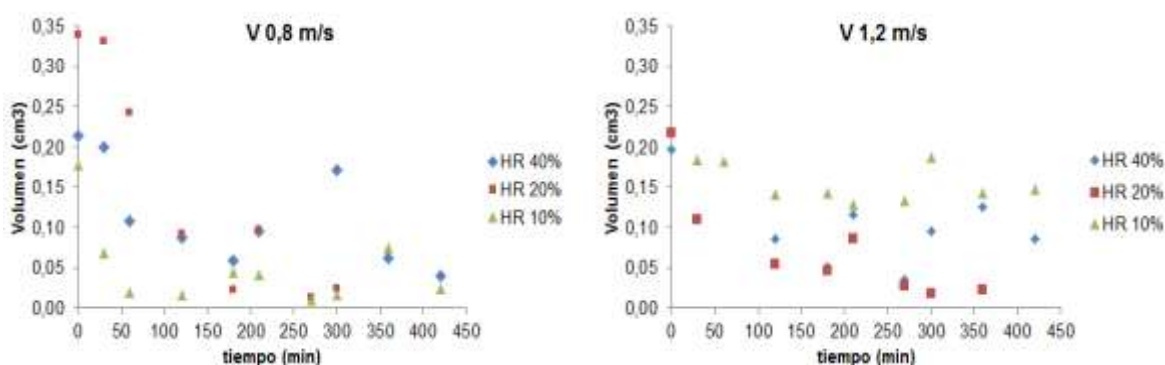


Figura 10. Comportamiento del volumen en el secado a las tres condiciones de humedad relativa.

En general no se aprecia una tendencia del comportamiento del cambio de volumen por efecto de los factores HR y velocidad del aire, no obstante si se observa que el V de las muestras disminuye durante el tiempo de secado. Esta disminución de V puede ser atribuida a la pérdida de humedad de las muestras durante el secado. De acuerdo a Mayor et al., (2004), la pérdida de agua y el calentamiento causan estrés en la estructura celular del alimento, originando un cambio en la forma y disminución en la dimensión.

6.3.4. Rehidratación

La figura 11 representa la capacidad de rehidratación de muestras de mango deshidratadas. Se aprecia que las muestras secadas a 0.8 m/s con HR-10% mostraron mayor capacidad de rehidratación que las muestras a 1.2 m/s del mismo nivel de HR. Este resultado indica que la velocidad del aire influye en la integridad celular del mango, a mayor velocidad del aire es mayor el daño estructural en la matriz celular de la fruta provocando menor capacidad de rehidratación.

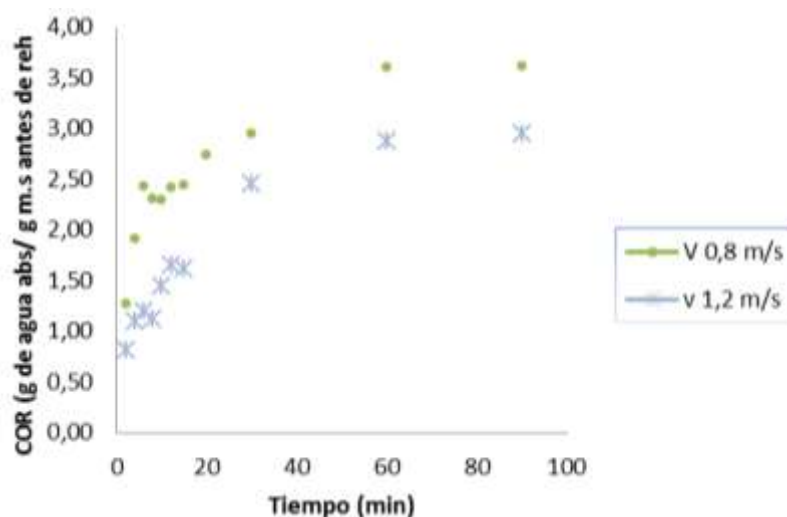


Figura 11. Capacidad de rehidratación del mango deshidratado en SBC a HR 10%.

El agua se absorbe más rápidamente al inicio del proceso y posteriormente disminuye gradualmente hasta alcanzar un equilibrio. Lo cual significa que todos los espacios intracelulares quedan saturados con agua o con solución hidratante. Durante la rehidratación el volumen se incrementa sucesivamente, junto con una salida de sólidos desde el interior de estos tejidos (Marín et al., 2006). El ANOVA (tabla 6) evidenció un efecto estadísticamente significativo ($P < 0.05$) en la capacidad de rehidratación para las muestras sometidas a dos velocidades de aire diferente.

Tabla 6. Prueba ANOVA para rehidratación

Humedad relativa 10%	
Velocidad del aire $m \cdot s^{-1}$	P-Valor
0,8	0,021
1,2	0,017

6.3.5. Vitamina C

La tabla 7 presenta los valores reportados por el laboratorio de análisis industrial para el contenido de vitamina C en las muestras de mango deshidratadas. Los análisis se realizaron para los tres tratamientos a una humedad en base seca promedio de 3.24 ± 0.11 %. Morton J.F., (1987), reporta para mango frescos un rango de vitamina C, como ácido ascórbico de 7.8 – 172.0 mg/100g de pulpa, mientras que Kohli et al., (1987) reporta un rango de 14 – 57 mg/100g de ácido ascórbico para el mango fresco.

Tabla 7. Valores de vitamina C como ácido ascórbico en muestras de mango deshidratadas en tres tratamientos.

MUESTRA	RESULTADO	
	Vitamina C como Ácido Ascórbico, en mg/ 100 g	Coefficiente de variación
Velocidad aire 0.8 ms^{-1} , HR 10%	69,64	0,39
Velocidad aire 0.8 ms^{-1} , HR 40%	29,65	2,38
Velocidad aire 1.2 ms^{-1} , HR 10%	56,68	2,65

Se observa que la muestras de mango deshidratadas a HR 40% y velocidad de aire 0.8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ reportaron el valor de vitamina C más bajo, probablemente se deba a que la muestra requirió de más tiempo para alcanzar la humedad en base seca promedio, Matos et al. (2010) demostró que el contenido de vitamina C desciende con el tiempo de exposición en muestras de jugo de carambola fresco y concentrado. Aunque la HR de 40% implica la menor temperatura del proceso el factor tiempo es determinante, conclusión similar obtuvo Erenturk et al. (2005) verificando que la más baja temperatura de secado (50°C) no fue favorable para el secado de rosa de mosqueta y el uso de una temperatura de (70°C) fue considerado como la condición óptima, ya que se logró un alto contenido de vitamina C, debido a un menor tiempo de secado.

De acuerdo al resultado que se obtuvo para las cinéticas de secado (la velocidad no afectó significativamente), las muestras de mango deshidratadas a una HR de 10% y una velocidad de 0.8 y 1.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ estuvieron sometidas al mismo tiempo de secado, por lo que se esperó que el resultado obtenido en contenido de vitamina C no fuera diferente para ellas, sin embargo, esa diferencia se atribuye al estado de maduración de la fruta, ya que las unidades experimentales tuvieron un porcentaje promedio de grados Brix de 12.64 ± 1.29 . La investigación de Valle et al. (2011) demostró la influencia de la maduración

sobre la vitamina C del tomate, obteniendo una disminución desde 85 ± 0.4 hasta 26 ± 0.3 (mg/100g) para el último estadio.

Kurozawa et al. (2013) considera como bajas temperaturas aquellas que estén entre 40 y 50°C, con las que obtuvo mayor retención de vitamina C ($52 \pm 8\%$ y $49 \pm 2\%$) para muestras de papaya, al igual Ramallo et al. (2012) verificaron que la piña secada a 45°C tuvo mayor retención (88.7%) que aquellas que se secaron a 75°C (63%), por lo tanto la técnica de secado con bomba de calor proporciona una menor degradación de la vitamina C debido a las bajas temperaturas a las que funciona ($< 56^\circ\text{C}$).

CONCLUSIONES

El estudio cinético de muestras de mango secadas con el secador asistido con bomba de calor mostró que a menor valor de HR se incrementan las pérdidas de humedad para un mismo tiempo de secado. Lo cual indica que a menor HR del aire se requiere menor tiempo de secado para alcanzar un nivel de humedad de la fruta. Por consiguiente el tratamiento de HR-10% en los dos niveles de velocidad del aire (0.8 y 1.2m/S) fue el que presentó las mayores pérdidas de agua durante el proceso de secado.

Las cinéticas de secado de muestras de mango mostraron que no son dependientes del factor velocidad del aire de secado en los dos niveles (0.8 y 1.2 m/s), debido posiblemente a la diferencia cercana de 0.4 m/s.

Los modelos cinéticos de Newton, Page y Handerson-Pabis presentaron un buen ajuste, pero el modelo de Page fue el que mostró el mejor ajuste por presentar los valores más altos de coeficiente de correlación (R^2 más cercano a 1) y el valor más bajo del coeficiente x^2 (más cercano a 0).

La actividad de agua de muestras de mango mostró su dependencia ($p < 0.05$) con el factor HR en los niveles estudiados, a menor HR menor fue la a_w ; mientras que con el factor velocidad del aire en los niveles 0.8 y 1.2 m/s la a_w no fue dependiente ($p > 0.05$).

Los parámetros de color L y b^* fueron estadísticamente afectados por la HR, se observó que al disminuir el nivel de HR (mayor temperatura) se incrementaron L^* y b^* , los cuales son indicativo de que las muestras presentaron mayor claridad y mayor color amarillo característico del mango (color más vivo). Con respecto al cambio total de color (ΔE) no se observó influencia significativa de factores HR y velocidad del aire.

Los cambios de volumen de las muestras de mango fueron influenciados por el tiempo de secado y no por la HR y la velocidad del aire.

Se evidenció que la velocidad del aire influyó significativamente en la capacidad de adsorción de agua en las muestras de mango durante el proceso de rehidratación. Se apreció que a 0.8 m/s con HR-10% las muestras mostraron mayor capacidad de rehidratación que las de 1.2 m/s con el mismo nivel de HR. Este comportamiento parece indicar que mayor velocidad del aire ocasiona mayor daño estructural de la matriz celular de la fruta provocando menor capacidad de rehidratación.

De acuerdo a los resultados de este trabajo, la técnica de secado asistido con una bomba de calor mostró ser una alternativa interesante de conservación de muestras de mango por: reducir el tiempo de secado, lograr un alimento estable con valores inferiores de a_w de 0.60 y no afectar significativamente el color en términos de luminosidad y en cambios

de tonalidad. Además, el volumen y el contenido de vitamina C no sufrieron mayores cambios debido a la ventaja que proporciona el equipo de manejar humedades relativas bajas, lo que implica una exposición de las muestras a temperaturas inferiores a 56°C conservando significativamente sus propiedades.

RECOMENDACIONES

Garantizar la homogeneidad de la materia prima para obtener mejores resultados, dado que la variación en la madurez del mango genera datos atípicos en las pruebas.

BIBLIOGRAFIA

- Abonyi, B.I., Tang, J., & Edwards C.G. (1999) Evaluation of energy efficiency and quality retention for the refractance window drying system. Research report, 1-3
- Akpinar E.K. (2005). "Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits". Journal of Food Engineering. Vol. 73 N° 1, pp. 75-84.
- AOAC. 1980. *Official methods of analysis*. Washington D.C.
- BanuKoç, I.E., Figen E. (2007). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. Journal of Food Engineering 85, pp 340-349.
- Barreiro, J.A., Milano, M. y Sandoval A.J. (1997). Kinetics of color change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. Journal of Food Engineering 33, 359-37.
- Carrillo, J.P. (2008). Secado de pimiento morrón (*Capsicum annum*) en lecho fluidizado con ciclos de atemperado y el efecto en su calidad. Instituto Politécnico Nacional.
- Cengel Y.A., Boles, M.A. (2006). Termodinámica. Sexta Edición. McGraw Hill. Mexico.
- Chong C et al., (2013). Colour, phenolic content and antioxidant capacity of some fruits dehydrated by a combination of different methods. Food chemistry. pp 3889–3896.
- Dartico S.A.S. (2009). Manual del Usuario para el Secador de Bomba de Calor con circuito de operación cerrado. Referencia DSBC1.
- Dissa, A.O., Desmorieux, H., Bahtiebo, J., Koulidiati, J. (2008). Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera indica* L. cv. "Amelie") with correction for shrinkage. Journal of Food Engineering 88, 429-437.
- Durance, T. D., Wang, J. H., & Meyer, R. S. (1999). Processing for drying mango and pineapples. US Patent No. 5 962 057.
- El-Aouar, Â.A., Moreira-Azoubel P., Xidieh-Murr, F.E., (2003). Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (*Carica papaya* L.). Journal of Food Engineering 59(1), 85-91.
- Ertekin, C., Yaldiz, O., (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. Journal of Food Engineering 63(3), 349-359.

- Falade K.O., Shogaolu O.T., (2007). Desidratação, avaliação da composição química e atividade de água de abóbora (*Cucurbitamoschata*) II JORNADA NACIONAL DA AGROINDÚSTRIA.
- FAO, (2001), Human vitamin and mineral requirements, Report of a joint FAO/WHO expert consultation Bangkok Thailand, Chapter 6.
- Fatouh M., Metwally M.N., Helali A.B., Shedid M.H. (2005). "Herbs drying using a heat pump dryer". *Energy Conversion & Management*.
- Fennema, R. (1993). *Química de los alimentos*. Zaragoza, España. Editorial Acribia.
- Fito P., Andrés A. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, España.
- Giraldo A.D., Arevalo A., Silva A.F., Silva P.F., Valdes J.C., Pavlak M.C., (2008). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobromagrandiflorum*) en rodajas.
- Guerrero, L.; Núñez, M. (1991). El proceso de secado en los alimentos. *Alimentación, Equipos y Tecnología*, diciembre, 111-115.
- Haro A, (2007). *Propiedades nutricionales del mango*. Universidad de Granada – Instituto de nutrición y tecnología de los alimentos. Web:http://www.pulevasalud.es/ps/contenido.jsp?ID=13177&TIPO_CONTENIDO=Articulo&ID_CATEGORIA=90&ABRIR_SECCION=2&RUTA=1-2-45-90
- Huang. B., Mujumdar, A.S. (1993). Use of neural network to predict industrial dryer performance. *Drying Technology* 11, 525-541.
- Hunt, R. (1998). *Measuring colour*. Kingston-upon-Thames: Fountain Press.
- Kaya, A., Aydın, O., Demirtaş C. (2009). Experimental and theoretical analysis of drying carrots. *Desalination* 237, 285-295
- Kohli, K., Qadry, J.s., Ali, M. (1987). Protein, amino acids and ascorbic acid in some cultivars of mango. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 39, 247-252.
- Krokida M.K, Marinos-Kouris D. (2003) Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of food engineering*. P 1-7.
- Krokida M.K., Karathanos V.T., Maroulis Z.B., (2002) Marino D. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering* 59 (2003) 391-403

- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. (2000). Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *Journal of FoodEngineering*, 43 (3), 147-154.
- Kurozawa, L.E., Terng, I., Dupas, M., Jin, K. (2013). Ascorbic acid degradation of papaya during: Effect of process conditions and glass transition phenomenon. *Journal of Food Engineering* 123 (2014) 157-164.
- Lozano, J.E., Rotstein, E., Urbicain, M.J. (1980). Total porosity and open porosity in the drying of fruits. *Journal of Food Science*, 45, 1403-1407.
- Marin E, Lemus R, Flores V, Vega A,. (2006). la rehidratación de alimentos deshidratados. Universidad de la Serena.
- Matos, A., Chuquilin, E.F. (2010). Estudio de la influencia de la concentración en la retención de vitamina C en jugo fresco y concentrado de Carambola (Averrhoa carambola L.). *Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, Vol. 1, N° 1, 36-42.
- Mayor, L., Sereno, A.M. (2004). Modelling shrinkage during convectiva drying of food materials: a review. *Journal of FoodEngineering* 61, 373-386.
- McCabe W.L., Smith J.C., Harriott P., (1991). Operaciones unitarias en ingeniería química. Cuarta edición, Madrid, McGraw-Hill.
- Mora J., Gamboa P., Elizondo R, (2002). Guía para el cultivo de mangos. INTA No. Pág. 9.
- Moreno, A., León, D., Giraldo, G., Ríos, E. (2009). Estudio de la cinética fisicoquímica del mango (*Mangifera indica* L. Var. Tommy Atkins) tratado por métodos combinados de secado. Universidad del Quindío.
- Morton, J.F. (1987). *Fruits of warm climates*. J.F. Morton Pub. Miami. 505 p. Tomada del libro "El cultivo del mango", Galán V.
- Mustafa, A., Ceylan, I., Yilmaz, S. (2008). Determination of drying characteristics of apple in a heat pump and solar dryer. *Desalination* 239 (2009) 266-275.
- Navarro M, (2007), Tecnología de alimentos, Colegio de bachilleres del estado de sonora.
- Nieto, A., Castro, M.A., Alzamora, S.M. (2001). Kinetics of moisture transfer during air drying of blanched and/or osmotically dehydrated mango. *Journal of Food Engineering* 50, 175-185.
- Norma técnica colombiana, NTC (5210) Icontec (2003). Frutas frescas, mango, variedades mejoradas, especificaciones.

- Ocampo, A., (2006). Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. Revista EIA, Número 5, pp 119-128.
- Ochoa-Martinez, C.I., Quintero, P.T., Ayala, A.A., Ortiz, M.J., (2012). Drying characteristics of mango slices the RefractanceWindow™ technique. Journal of Food Engineering 109(1), 69-75.
- Park K.J., Bin A., Brod F.P.R. (2003). Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. Journal of Food Engineering, Vol 56 pp. 97-103.
- Paul U. S, Khan M. K (2009). Performance evaluation of heat pump dryer. Food sci technol.
- Phoungchandang S., Saentaweek S., (2010). Effect of two stage, tray and heat pump assisted-dehumidified drying on drying characteristics and qualities of dried ginger. Food and Bioprocess Processing 429-437.
- Prasertsan, S., y Saen-saby, P. (1998). Heat pump drying of agricultural materials. Drying Technology—An International Journal, 16(1–2), 235–250.
- Rahman M.S. 1999. Handbook of Food Preservation. Marcel Dekker, Inc. New York, pp 173-216.
- Ramallo, L.A., Mascheroni, R.M. (2012). Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. Food and Bioprocess Processing 90 (2), 275-283.
- Rogeles L, Saldarriaga J (2011). Efecto del secado convectivo asistido con bomba de calor sobre las características fisicoquímicas de la zanahoria deshidratada (daucus carota L.). Universidad del Valle, Facultad de ingeniería.
- Ruiz, I.L., Garcia, M.A. (2007). Analytical solution for food drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. Journal of Food Engineering Research and Design 87, 885-898.
- Sagar V.R., Suresh, P. (2010). Recent advances in drying and dehydration on fruits and vegetables: a review. Chemistry and Materials Science, Journal of Food Science and Technology, Vol. 47 (1), 15-26.
- Shafiur, M. (2006). "State diagram of foods: Its potential use in food processing and product stability". Trends in Food Science & Technology. 17: 129-141.
- Soliva, R.C., Martin O. (2003). New advances in extending the shelf life of fresh-cut-fruits: a review. Trends in Food Science and Technology 14(9), 341-353.

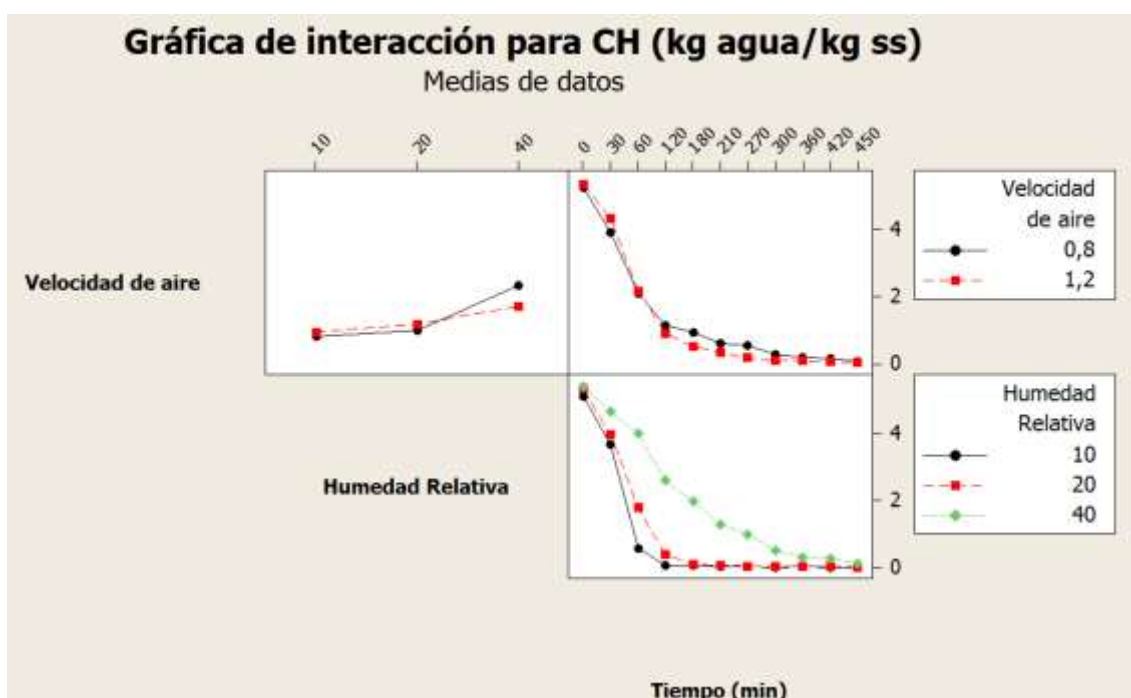
- Tedjo, W., Taiwo, K.A., Esthiaghi, M.m Knorr D. (2001). Comparison of pretreatment methods on water and solid diffusion kinetics of osmotically dehydrated mangos. *Journal of Food Engineering* 53 (2002) 133-142.
- Teeboonma U, Tiansuwan J, Soponronnarit S. (2003). Optimization of heat pump fruit dryers. *J.FoodEng.*
- Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Kunwisawa, J., Soponronnarit, S., (2011). Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *Food Science and Technology* 44(6), 1502-1510.
- Togrull T., Pellivan D. (2003). "Modelling of drying kinetics of single apricot". *Journal of Food Engineering*, vol. 58. Pp. 23-32.
- Toivonen, P.M, Brummell, D.A. (2008). Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technolingu* 48(1), 1-14.
- Torres J.D, (2007). Optimización de las condiciones de operación de tratamientos osmóticos destinados al procesado mínimo de mango (*Mangifera indica* L.) Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Torres, J.D. Talens P., Carot, J.M., Chiralt, A., Escriche. I. (2007). Volatile profile of mango (*Mangifera indica* L.), as affected by osmotic dehydration. *Food Chemistry* 101(1), 219-228.
- Valle, M.E., Rodriguez, G. (2011). Evaluación de vitamina C por HPLC en el desarrollo postcosecha del tomate (*Solanum lycopersicum* v. Dominator). *ECIPerú*, vol. 8, Nº 1, 48-53.
- Vega A., Andrés A., Fito P. (2005). "Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*Capsicum annum* L. cv Lamuyo). *Revista Información tecnológica*. Vol. 16 Nº 6, pp 3-11.
- Vega-Gálvez A., Miranda M., Clavería R., Quispe I., Vergara J., Uribe E., Paez H., DiScala K. (2011). Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmotreated jumbo squid (*Dosidicus gigas*). *Journal of Food Science and Technologic* 44(1), 16-23.
- Zamora B, (2009), Deshidratador de tomates utilizando energía geométrica para ensenada b.c, Universidad nacional de México, Pag 42

- Zou, K., Teng, J., Huang L., Dai, X., Baoyao, W., (2012). Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. Food science and technology.
- Zuluaga, J.D., Cortes, M., Rodríguez, E. (2010), Evaluación de las características físicas de mango deshidratado aplicando secado por aire caliente y deshidratación osmótica, Universidad Nacional de Colombia, Revista de la facultad de ingeniería, pp. 127-135.

ANEXOS

Anexo1. Análisis de varianza para la humedad en base seca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Velocidad de aire	1	0,1667	0,1667	3,18	0,090
Humedad Relativa	2	16,2624	8,1312	155,33	0,000
Tiempo (min)	10	192,4587	19,2459	367,65	0,000
Velocidad de aire*Humedad Relativa	2	2,2185	1,1093	21,19	0,000
Velocidad de aire*Tiempo (min)	10	0,7887	0,0789	1,51	0,209
Humedad Relativa*Tiempo (min)	20	13,1422	0,6571	12,55	0,000
Error	20	1,047	0,0523		
Total	65	226,0842			

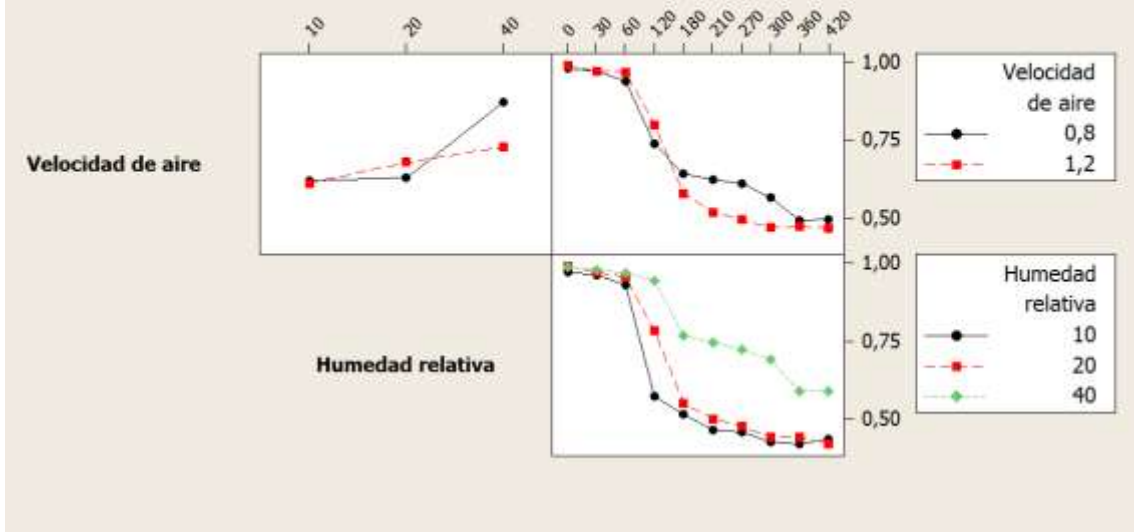


Anexo 2. Análisis de varianza para la actividad de agua

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Velocidad de aire	1	0,016236	0,016236	2,54	0,128
Humedad Relativa	2	0,378361	0,189181	29,59	0,000
Tiempo (min)	9	2,388038	0,265338	41,5	0,000
Velocidad de aire*Humedad Relativa	2	0,098021	0,04901	7,66	0,004
Velocidad de aire*Tiempo (min)	9	0,048367	0,005374	0,84	0,590
Humedad Relativa*Tiempo (min)	18	0,183676	0,010204	1,6	0,165
Error	18	0,1151	0,006394		
Total	59	3,227798			

Gráfica de interacción para Actividad de agua

Medias de datos

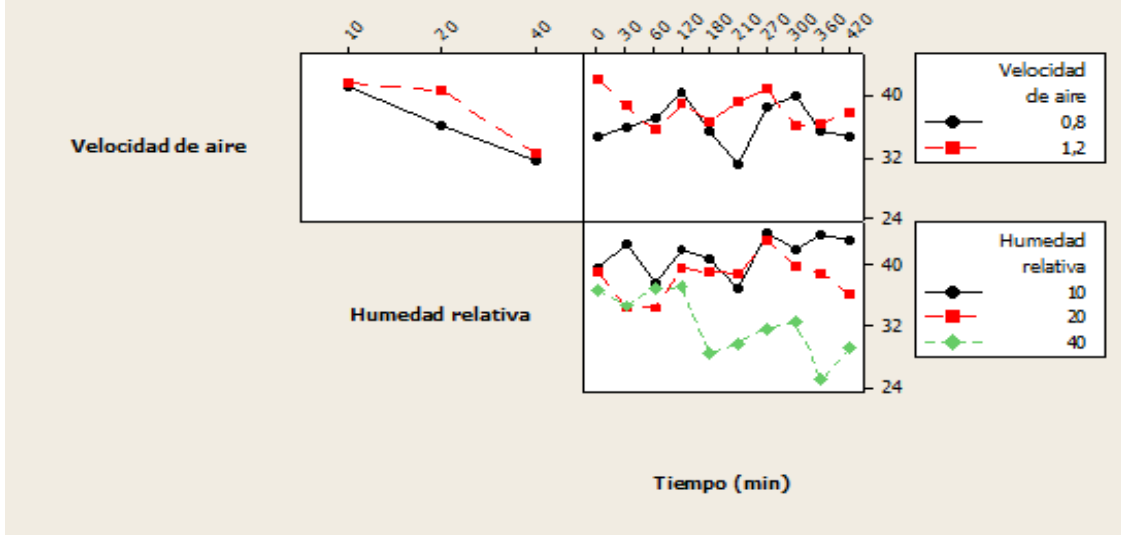


Anexo 3. Análisis de varianza para la luminosidad L*

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Velocidad del aire	1	54,32	54,32	1,93	0,182
Humedad relativa	2	892	446	15,833	0,000
Tiempo (min)	9	139,69	15,52	0,55	0,819
Velocidad de aire* Humedad relativa	2	53,82	26,91	0,96	0,403
Velocidad de aire* Tiempo (min)	9	191,44	21,27	0,75	0,657
Humedad relativa*Tiempo (min)	18	428,69	23,82	0,85	0,637
Error	18	507,13	28,17		
Total	59	2267,1			

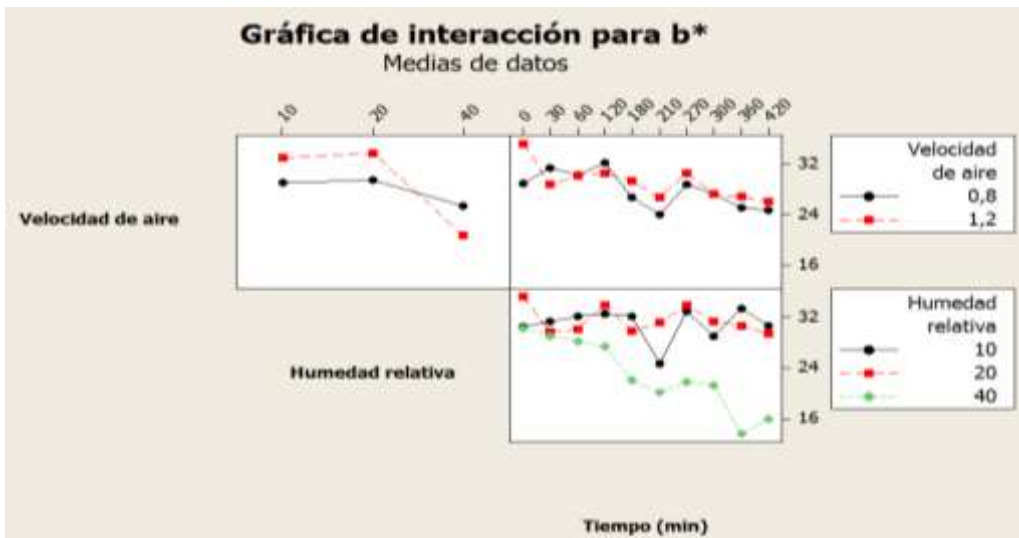
Gráfica de interacción para Luminosidad

Medias de datos



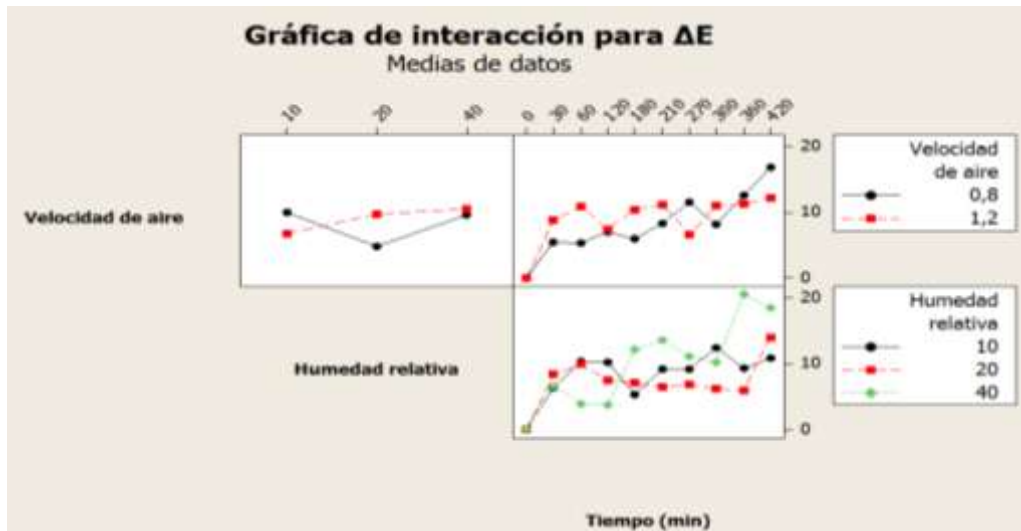
Anexo 4. Análisis de varianza para el parámetro b*

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Velocidad del aire	1	21,83	21,83	0,82	0,378
Humedad relativa	2	924,18	462,09	17,33	0,000
Tiempo (min)	9	334,46	37,16	1,39	0,021
Velocidad de aire* Humedad relativa	2	258,43	129,21	4,85	0,938
Velocidad de aire* Tiempo (min)	9	87,07	9,67	0,36	0,564
Humedad relativa*Tiempo (min)	18	444,49	24,69	0,93	
Error	18	479,97	26,67		
Total	59	2550,4			



Anexo 5. Análisis de varianza para ΔE

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Velocidad del aire	1	22,07	11,07	0,43	0,517
Humedad relativa	2	79,3	39,65	1,54	0,231
Tiempo (min)	9	755,82	83,98	3,25	0,008
Velocidad de aire* Humedad relativa	2	164,87	82,43	3,19	0,056
Humedad relativa* Tiempo (min)	18	469,16	26,06	1,02	0,474
Erros	27	692,6	25,65		
Total	59	2172,8			



Anexo 6. Análisis de varianza para cambio de volumen

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Velocidad de aire	1	0,011027	0,011027	2,27	0,149
Humedad Relativa	2	0,000849	0,000424	0,09	0,917
Tiempo (min)	9	0,213	0,023667	4,88	0,002
Velocidad de aire*Humedad Relativa	2	0,091626	0,045813	9,44	0,002
Velocidad de aire*Tiempo (min)	9	0,042212	0,00469	0,97	0,497
Humedad Relativa*Tiempo (min)	18	0,100175	0,005565	1,15	0,387
Error	18	0,087341	0,004852		
Total	59	0,54623			